



# OPTIMALIZACE KONSTRUKCE PLASTOVÉHO DÍLU

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2341 – Strojírenství  
*Studijní obor:* 3911R018 – Materiály a technologie

*Autor práce:* **Jiří David**  
*Vedoucí práce:* Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# OPTIMALIZATION OF THE DESIGN OF PLASTIC PART

## Bachelor thesis

*Study programme:* B2341 – Engineering  
*Study branch:* 3911R018 – Material and Technology

*Author:* **Jiří David**  
*Supervisor:* Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.





## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jeho skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a cenné rady.

Díky samozřejmě patří také celé mé rodině za všeobecnou podporu při studiu.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou optimalizace konstrukce plastového dílu - držáku sluneční clony. Práce je rozdělena na dvě části, a to na teoretickou a experimentální část. Teoretická část je zaměřena na popis technologie vstřikování plastů, objasnění zásad konstrukce plastových dílů a rozbor vznikajících vad. Experimentální část je zaměřena na popis postupu při optimalizaci konstrukce dílu. Změny na konstrukci byly prováděné na základě výsledků simulací vstřikovacího procesu v programu Cadmould. V simulačním softwaru byly dále upraveny také vstřikovací podmínky. V závěru práce jsou poté uvedeny získané výsledky.

***Klíčová slova:*** *plastový díl, držák sluneční clony, optimalizace konstrukce, vstřikování plastů, simulace vstřikovacího procesu*

## **Annotation**

This bachelor thesis examines the issue of design of plastic part – sun visor holder. This thesis is divided into two parts, to a theoretical part and an experimental part. The theoretical part is focused on description of injection moulding, clarification of the principles of design of plastic parts and analysis of emerging defects. The experimental part is focused on description of the procedure in the production of plastic part. Design changes were made on the based of the results of the simulation of the injection process in Cadmould program. Injection conditions were then adjusted in this simulation software. The obtained results are presented in the conclusion of the thesis.

***Key Words:*** *plastic part, sun visor holder, optimalization of the design, injection molding, simulation of injection process*

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>11</b>
2.1 Polymery	11
2.1.1 Rozdělení polymerů	11
2.1.2 Molekulární struktura polymerů	11
2.1.3 Nadmolekulární struktura polymerů	12
2.1.4 Charakteristické teploty polymerů	12
2.1.5 Úprava polymerů	13
2.2 Vstřikování plastů	14
2.2.1 Vliv technologických podmínek	15
2.2.1.1 Vstřikovací tlak	15
2.2.1.2 Vstřikovací cyklus	15
2.2.1.3 Vstřikovací teplota taveniny	17
2.2.1.4 Teplota formy	17
2.2.2 Vlastnosti výstřiků	18
2.2.3 Řešení vtokové soustavy	19
2.2.3.1 Základní druhy vtoků a jejich vliv na proudění taveniny	19
2.2.4 Řešení tvaru plastových výrobků	20
2.2.4.1 Zásady konstrukce plastových dílů	20
2.2.5 Vady výstřiků	23
2.2.5.1 Základní rozdělení vad	23
2.2.5.2 Vady a jejich příčiny	23
2.3 Počítačová simulace v praxi	26
2.4 Simulační software cadmould 3d-f	26
<b>3 Experimentální část</b>	<b>27</b>
3.1 Popis funkce simulovaného dílu	27
3.2 Volba materiálu	27
3.2.1 Charakteristika zvoleného materiálu	27
3.3 Výsledky vstřikování do původní konstrukce formy	28
3.4 Simulace vstřikování první varianty konstrukce	29
3.4.1 Vstupní parametry simulace	30

3.4.2 Výsledky simulace .....	31
3.4.3 Zhodnocení výsledků simulace .....	32
3.5 Simulace vstřikování druhé varianty konstrukce .....	33
3.5.1 Vstupní parametry simulace .....	33
3.5.2 Výsledky simulací .....	34
3.5.3 Zhodnocení výsledků simulací .....	36
3.6 Simulace vstřikování třetí varianty konstrukce .....	37
3.6.1 Vstupní parametry simulace .....	38
3.6.2 Výsledky simulace .....	38
3.6.3 Zhodnocení výsledků simulace .....	39
3.7 Simulace vstřikování čtvrté varianty konstrukce .....	39
3.7.1 Výsledky simulace .....	40
3.7.2 Zhodnocení výsledků simulace .....	41
3.8 Optimalizace vstřikovacích parametrů .....	42
3.8.1 Výsledky simulace po změně vstřikovacích parametrů .....	43
3.8.2 Zhodnocení výsledků .....	44
<b>4 Diskuze dosažených výsledků .....</b>	<b>44</b>
<b>5 Závěr .....</b>	<b>45</b>
Seznam použité literatury: .....	47
Seznam obrázků: .....	49
Seznam tabulek: .....	50



## Seznam použitých zkratk a symbolů:

<i>CAD</i>	Computer Aided Design (počítačová podpora návrhu)	
$F_p$	síla přísuvu	[N]
$F_u$	síla uzavírací	[N]
<i>PA</i>	polyamid	
$p_i$	vnitřní tlak v dutině vstřikovací formy	[MPa]
$p_z$	zbytkový tlak v dutině vstřikovací formy	[MPa]
<i>POM</i>	polyoxymethylen	
$s_k$	dráha (pohyb) šneku	[mm]
$s_n$	dráha (pohyb) nástroje	[mm]
<i>STEP</i>	souborový formát - Standard for Exchange of Product model data	
<i>STL</i>	souborový formát – Stereolitografie	
$t_d$	čas dotlaku	[s]
$T_f$	teplota viskózního toku u amorfních plastů	[°C]
$T_g$	teplota zesklenní u amorfních plastů	[°C]
$t_{ch}$	čas chlazení	[s]
$T_m$	teplota tání u semikrystalických plastů	[°C]
$t_m$	čas vyhození výstřiku	[s]
$t_{pl}$	čas plastifikace	[s]
$t_{s1}$	čas přísuvu pohyblivé části formy k pevné (strojní čas 1)	[s]
$t_{s2}$	čas uzamčení formy (strojní čas 2)	[s]
$t_{s3}$	čas otevření formy (strojní čas 3)	[s]
$T_t$	teplota taveniny	[°C]
$t_v$	čas vstřikování	[s]
$T_z$	teplota rozkladu plastů	[°C]
<i>UV</i>	ultraviolet - ultrafialový	

## 1 ÚVOD

Plasty byly objeveny už v 19. století, kdy byla většina z nich využívána pouze armádním sektorem. Opravdu významným materiálem se plasty staly až v několika posledních desetiletích. V současnosti už patří k nejdůležitějším materiálům dnešní doby. Obzvláště důležité postavení zaujímají ve strojírenství, kde tvoří samostatnou skupinu konstrukčních materiálů.

Ke zpracování plastů se používá řada technologií. Ve strojírenství je to vstřikování, vytlačování, lisování nebo válcování. Nejrozšířenější z nich je vstřikování. Řadí se do kategorie tvářecích technologií, při kterých se zásadním způsobem mění tvar výchozího materiálu. K tomu dochází prostřednictvím značného přemísťování částic. Principem této technologie je přivedení plastu do stavu taveniny a její následné vstříknutí do chladné dutiny formy. V té materiál tuhne a získává její tvar. Poté je forma otevřena, výrobek vyhozen a celý cyklus se může opakovat. V jediné operaci se tak mění polymerní směs v hotový výrobek. Technologie vstřikování se používá pro výrobu kvalitních a dostatečně rozměrově přesných součástí z termoplastů a reaktoplastů.

Návrh a výroba plastových dílů je složitá činnost spjatá s četnými problémy se zpracováním a strukturou plastů. Z tohoto důvodu je návrh výrobků z plastů složitější než navrhování kovových výrobků. Díl samotný, ale i forma, do které bude plast vstřikován, musí být konstruovány podle určitých zásad a doporučení. Při jejich neznalosti nebo nedodržení je výroba doprovázena výskytem vad a nepřesností na hotových výrobcích. To vede ke vzniku neshodných výrobků a následnému zvyšování výrobních nákladů. Složitost těchto dílů, požadavky na jejich kvalitu, ale i tlak od konkurenčních výrobců nás nutí odhalit tyto problémy již ve fázi vývoje. Nejlepší variantou v tomto směru jsou simulační programy. Procesní simulace se podílejí nejen na odhalování chyb a nedostatků plastových dílů a forem, ale pomáhají také stanovit optimální technologické parametry a přesnější výrobní náklady.

Cílem této práce je tvarově optimalizovat konstrukci plastového držáku sluneční clony. Vzhledový díl je určen pro náročný automobilový průmysl. Při jeho vstřikování do původní formy docházelo ke vzniku četných vzhledových i pevnostních vad na hotovém výrobku. Záměrem této práce je pomocí procesních simulací prováděných v softwaru Cadmould 3D-F odhalit chyby a nedostatky na původní konstrukci držáku. Následně model dílu tvarově upravit a stanovit pro něj optimální technologické parametry tak, aby byly příčiny vzniku vad odstraněny, nebo zmírněny na minimum, a zároveň zůstala zachována funkčnost dílu.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 POLYMERY

Polymery jsou organické makromolekulární látky, což znamená, že jsou tvořeny řetězci molekul, ve kterých se opakuje jedna nebo více základních stavebních jednotek – monomerů. Mohou být přírodního nebo syntetického původu. [8]

Syntetické polymery se připravují pomocí polyreakcí (polymerace, polykondenzace, polyadice). Jsou to jednoduché chemické reakce, při kterých monomery přechází ve vysokomolekulární polymery. Polymer se nazývá plastem poté, co je smíchán s nezbytnými přísadami a přiveden do formy, ve které se dá technologicky zpracovat. Chemická látka polymer se tedy změní v technický materiál s vhodnými vlastnostmi. [6]

#### 2.1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ

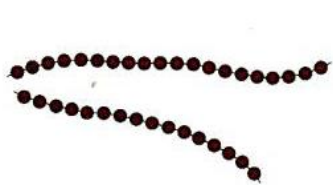
Podle teplotního chování polymery dělíme na:

- **termoplasty** – materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu. Do pevného stavu se vrací opětovným ochlazením. Jedná se o fyzikální proces bez chemických změn struktury, který lze bez omezení opakovat.
- **reaktoplasty** – v první fázi zahřívání měknou, ale pouze po omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – vytvrzování. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit. Dalším zahříváním dochází k rozkladu hmoty.
- **elastomery** (kaučuky, pryže) – působením tepla měknou a dají se po omezenou dobu tvářet, další zahřátí způsobuje chemickou reakci - prostorové zesíťování a probíhá tzv. vulkanizace. [6]

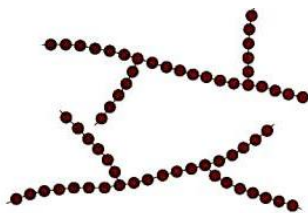
#### 2.1.2 MOLEKULÁRNÍ STRUKTURA POLYMERŮ

Makromolekuly, tedy řetězce opakujících se merů, se podle struktury dělí na:

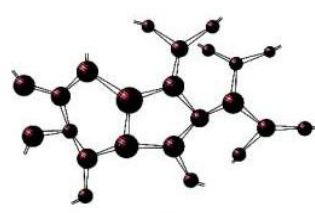
- **lineární** – mají uspořádány základní stavební jednotky za sebou a tvoří jednoduchý řetězec. Mají vyšší stupeň krystalinity. (obr. 2.1)
- **rozvětvené** – z jednoduchých řetězců vystupují postranní větve. Struktura má menší hustotu než struktura lineární, hůře krystalizují a mají horší tekutost v roztaveném stavu. (obr. 2.2)
- **síťované** – trojrozměrná síť monomerů, které mají tři aktivní kovalentní vazby. Zesíťováním dochází ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Sítě mohou být řídké (elastomery), nebo husté (polymery). (Obr. 2.3) [6, 8]



**Obr. 2.1:** Lineární  
uspořádání [8]



**Obr. 2.2:** Rozvětvené  
uspořádání [8]

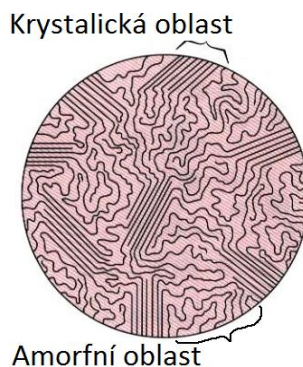


**Obr. 2.3:** Síťované  
uspořádání [8]

### 2.1.3 NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA POLYMERŮ

Polymerní látky, především lineární a málo větvené mají schopnost částečné krystalizace, což je samovolné uspořádání makromolekul při přechodu z kapalného stavu do tuhého. Jejich části se skládají a vytvářejí tak pravidelnou prostorovou strukturu. Skládají se do destičkovitých lamel, které vyrůstají na sobě takzvaným dendritickým způsobem a vytvářejí větší kulovité útvary nazývané sferolity. Částečná krystalizace znamená, že mezi uspořádanou krystalickou strukturou je i neuspořádaná amorfní struktura (relativní podíl krystalických oblastí se udává stupněm krystalinity). Polymery bez schopnosti krystalizace jsou tedy amorfní – neuspořádané i v tuhém stavu.

Krystalické polymery mají oproti amorfním vyšší mechanické vlastnosti a vyšší hustotu. Při krystalizaci se zmenšuje objem, proto mají tyto materiály větší smrštění. [2]



**Obr. 2.4:** Struktura semikrystalického polymeru [8]

### 2.1.4 CHARAKTERISTICKÉ TEPLOTY POLYMERŮ

Zvyšování teploty způsobuje u polymerů výraznou změnu vlastností. Změny jsou vázány na charakteristické teploty, které se pro amorfní a krystalické plasty liší.

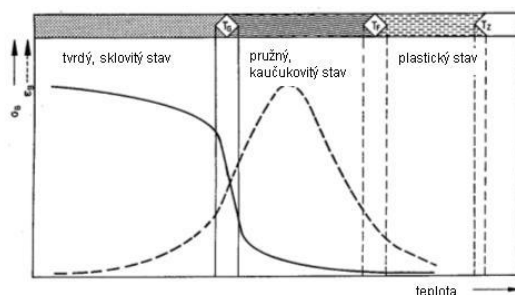
#### Amorfní plasty

Zvyšováním teploty přechází z křehkého sklovitého stavu přes teplotu zesklenní  $T_g$  (ta je výrazně nad teplotou okolí) do stavu viskoelastického. Dalším zvyšováním teploty překročí teplotu viskózního toku  $T_f$ , nad níž se vyskytují ve viskózním stavu.

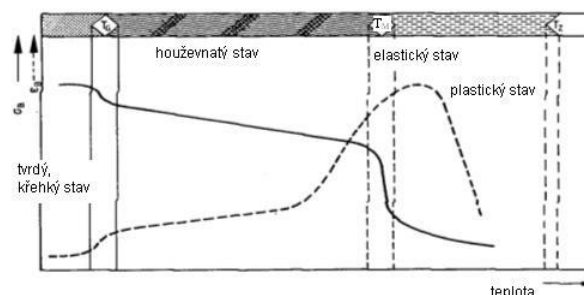
## Semikrystalické plasty

Pravidelná krystalická struktura se rozpadá přímo na viskózní taveninu při teplotě tání krystalického podílu  $T_m$ , amorfnní část polymeru má svojí teplotu zesklennění  $T_g$  (ta se nachází pod teplotou okolí).

Dalším zvyšováním teploty dochází k destrukci polymeru, děje se tak při teplotě rozkladu  $T_z$ . [2]



**Obr. 2.5:** Průběh deformačních vlastností u amorfního plastu [6]



**Obr. 2.6:** Průběh deformačních vlastností u semikrystalického plastu [6]

### 2.1.5 ÚPRAVA POLYMERŮ

Základní polymer vyrobený jednou z polyreakcí nelze obvykle zpracovávat ani aplikovat na výstřiky. Pro získání požadovaných vlastností je nutné ho upravit vhodnými přísadami – aditivy.

- **Stabilizátory** – zvyšují odolnost materiálu (termooxidační a UV stabilizátory)
- **Změkčovadla** – snižují tuhost a tvrdost, zvyšují ohebnost a houževnatost
- **Modifikátory** – sloučeniny, vytvářející se základním polymerem směsí, výrazně modifikují vlastnosti základního polymeru
- **Maziva** – snižují viskozitu taveniny, zlepšují odformování
- **Retardéry hoření** – snižují hořlavost termoplastů
- **Barviva** – dávají materiálu požadovanou barvu, odstín a kryvost
- **Plniva** – kompozity – materiálové struktury ze dvou a více materiálů zcela odlišných vlastností
  - **Plniva částicová** – zvyšují viskozitu, tvrdost, tepelnou odolnost, zmenšují smrštění, např.: skleněné mikrokuličky, čedič, saze, slída...
  - **Plniva vyztužující** – zvyšují pevnost, tuhost, např. skleněná vlákna

Používají se také směsi, tzv. blendy (kompozitní slitiny), dvou polymerních materiálů, z nichž každý do směsi přináší to lepší ze svých vlastností. Lze tak připravit spoustu materiálů „šitých na míru“. [2]

## 2.2 VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

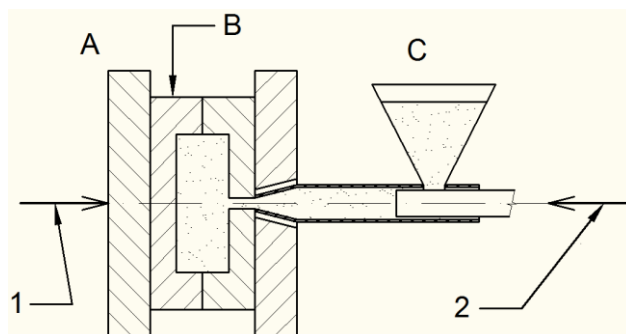
Technologie vstřikování je nejrozšířenější technologií na zpracování plastů. Uplatňuje se jak v průmyslové výrobě finálních dílů, tak výrobě polotovarů určených pro další zpracování. Umožňuje nám ekonomickou produkci kvalitních a dostatečně rozměrově i tvarově přesných výrobků, tzv. výstřiků. Pro vstřikování lze využít širokého spektra plastů. Lze jím zpracovat téměř všechny druhy termoplastů a v omezené míře i některé reaktoplasty. Stále více se dnes uplatňuje i při zpracování kaučukových směsí.

Principem technologie vstřikování plastů je přeměna polymeru na hotový výrobek v jediné operaci. Plast je roztaven v tavicí komoře a jeho tavenina je vstříknuta do uzavřené chladné formy. Po ztuhnutí taveniny se forma otevře, výstřik se vyjme a stroj je připraven k další operaci. [7]

Vstřikovací stroj (obr. 2.7) je tvořen třemi základními prvky: plastifikační a vstřikovací jednotkou, uzavírací jednotkou a formou. Základní parametr stroje je maximální vstřikovaný objem výstřiku [ $\text{cm}^3$ ], včetně vtokových zbytků, který lze vyrobit při jednom cyklu. Obdobným údajem je vstřikovací kapacita stroje [g].

Dále plastifikační kapacita [ $\text{kg/hod}$ ], která udává maximální množství plastu, které lze na stroji převést do stavu taveniny za jednu hodinu. Vstřikovací tlak [MPa], který vyvolá čelo šneku v tavenině plastu. Celková síla, kterou působí čelo šneku na taveninu, se nazývá vstřikovací síla [N].

Mimo to je stroj charakterizován také uzavírací a přidržovací silou [N]. [1]



**Obr. 2.7:** Vstřikovací stroj s pístovou vstřikovací jednotkou [1]

*A – uzavírací jednotka, B – forma, C- vstřikovací jednotka*

*1 – přidržovací síla, 2 – vstřikovací síla*

Hlavními výhodami vstřikování je krátký čas cyklu, schopnost výroby složitých dílů s dobrou rozměrovou přesností a velmi dobrá kvalita povrchu dílů. Vhodnou konstrukcí formy lze také eliminovat další opracování. Nevýhodou jsou vysoké investiční náklady v porovnání s ostatními metodami zpracování plastů, dlouhá doba výroby forem a používání neúměrně velkého zařízení v porovnání se vstřikovaným dílem. [7]

## 2.2.1 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK

Při vstřikování termoplastů se uplatňuje celá řada technologických parametrů. Každý se určitým způsobem podílí na vlastnostech finálního výrobku. Vliv jednotlivých faktorů nelze brát samostatně, protože spolu souvisejí a ve svých účincích se doplňují nebo si naopak odporují.

K nejdůležitějším technologickým faktorům patří vstřikovací tlak, vstřikovací teplota, teplota formy a časové rozčlenění vstřikovacího cyklu, tj. doba plnění formy, doba dotlaku a doba ochlazení. [4]

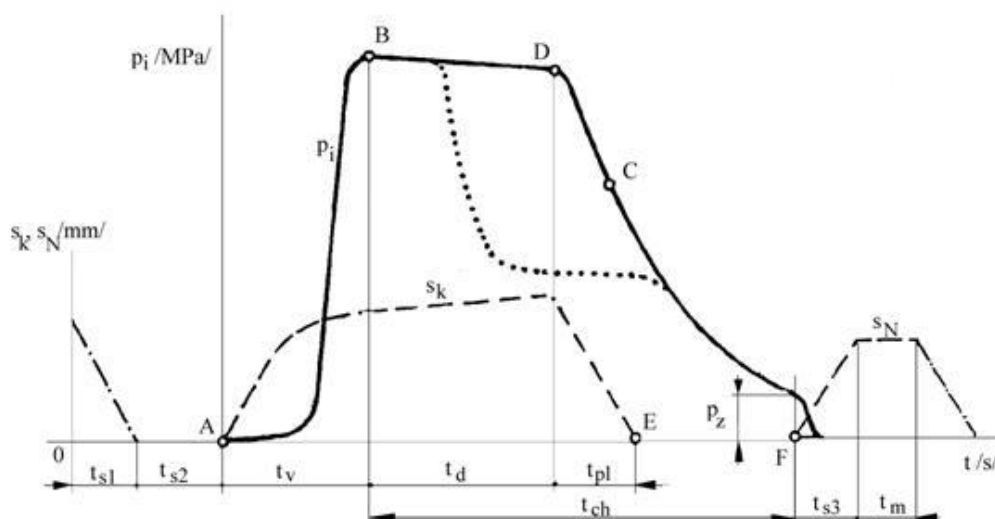
### 2.2.1.1 VSTŘIKOVACÍ TLAK

Síla, která působí na zplastifikovaný materiál v tavicí komoře během vstřikování, se nazývá vstřikovací síla. Je-li vztažena na jednotku plochy průřezu šneku nebo pístu, označuje se jako vnější vstřikovací tlak. Z hlediska kvality výstřiku je však rozhodující tlak v dutině formy, zvaný vnitřní vstřikovací tlak. Úkolem vstřikovacího tlaku je objemové vyplnění dutiny formy roztaveným plastem. [4]

### 2.2.1.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS

Vstřikování je dějem cyklickým. Cyklus se může posuzovat buď k poměrům ve formě, nebo v plastifikační jednotce. [4]

Při posuzování vstřikovacího cyklu z hlediska vstřikovaného plastu ho lze vyjádřit jako závislost tlaku v dutině formy na čase. Tlak v dutině formy (vnitřní tlak) značíme  $p_i$ . Tato závislost je znázorněna na obr. 2.8.



**Obr. 2.8:** Časová závislost tlaku  $p_i$  v dutině formy při vstřikování [7]

$s_k$  – pohyb šneku,  $s_n$  – pohyb nástroje (formy)

$t_{s1}$  – čas přísuvu pohyblivé části formy k pevné. Přísuv je vyvozen silou přísuvu  $F_p$ .

$t_{s2}$  – čas uzamčení formy, které zajistí, že materiál během vstřikování nevyteče ven. K uzamčení je třeba uzavírací síly  $F_u$ , ta je mnohem větší než síla přísuvu.

**A-B:** fáze vstřikování ( $t_v$  – čas vystřikování), šnek se dává do pohybu (pouze axiální, bez rotace, funkce pístu) a vstřikuje roztavený plast do dutiny formy. Tavenina je po jejím naplnění ještě dodatečně stlačena.

**B-D:** fáze dotlaku (čas dotlaku  $t_d$ ), ten, protože se tavenina při chladnutí smršťuje, kompenzuje změnu objemu a zabraňuje tak vzniku propadlin a staženin. Dotlak může být konstantní nebo se po několika sekundách může snižovat. V bodě D zamrzá vtokové ústí a dotlak již nemá smysl.

**D-E:** plastifikační fáze (doba plastifikace  $t_{pl}$ ), šnek se při ní začne otáčet a současně ustupovat zpět, přičemž překonává protitlak. Nabírá pod násypkou materiál, plastifikuje ho a vtlačuje do prostoru před šnek.

**B-F:** doba chlazení  $t_{ch}$  nastává ihned po vstupu taveniny do formy a trvá až do jejího otevření a vyjmutí výstřiku. Závisí na tloušťce stěn výstřiku a teplotě formy. Po ukončení dotlaku v bodě D výstřik ve formě chladne a tlak klesá až na hodnotu zbytkového tlaku  $p_z$ .

$t_{s3}$  – čas otevření formy

$t_m$  – čas vyhození výstřiku [4, 7]

### **Doba vstřikování**

Doba plnění formy závisí na rychlosti vstřikování, která souvisí se vstřikovacím tlakem a teplotou taveniny, s objemem výstřiku, jeho geometrickým tvarem, řešením vtokové soustavy atd.. Pohybuje se od zlomku sekundy do několika sekund, nebo i déle. [4]

Rychlost pohybu šneku ovlivňuje rychlost postupu čela taveniny. Ta by měla být ve všech průřezích tokových kanálů a místech tvarové dutiny formy konstantní – izotropní vlastnosti výstřiku. [2]

### **Doba dotlaku a jeho úroveň**

Po vyplnění dutiny formy se na taveninu musí dále působit tlakem šneku, aby se zabránilo zpětnému úniku taveniny z dutiny do tavicí komory a dále aby se vyrovnávalo zmenšení objemu hmoty v důsledku jejího smršťování během chladnutí. Dotlak může být po celou dobu konstantní nebo se může po několika sekundách snížit. Doba dotlaku končí zamrznutím hmoty ve vtokovém kanálu. V této době zbývá před čelem šneku v plastifikační komoře objem materiálu, kterému se říká „polštář“. [4]

Dotlaková fáze má z hlediska jakosti výstřiku největší vliv na tvarovou a rozměrovou přesnost. Dále ovlivňuje obsah vnitřního pnutí. Platí, že čím je dotlaková



fáze jemnější, tím je i menší vnitřní pnutí. Proto se doporučuje dotlak profilovat se sestupnou tendencí (30 – 50% max. hodnota dotlaku, potom pokles). [2]

Příliš pozdní přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak má za následek vysoké tlakové maximum ve formě, vznik přetoků, zvýšení hmotnosti výstřiku, větší vnitřní pnutí, namáhání formy a zatížení uzavírací jednotky. Předčasné přepnutí naopak vyvolá propad tlaku v dutině formy, nedotečení taveniny, zmenšení hmotnosti výstřiku, vady povrchu, větší smrštění, staženiny a propadliny. [2]

### **Doba ochlazování**

Dobou ochlazování rozumíme součet doby dotlaku a chlazení. Doba chlazení je část výrobního cyklu od skončení dotlaku až do otevření formy. Během této doby musí u běžných vstřikovacích strojů proběhnout plastifikace. [2]

Doba chlazení závisí na druhu plastu, určující tloušťce stěny, teplotě formy a teplotě výstřiku v okamžiku vyjímání z formy. Má být tak dlouhá, aby při vyhození výstřiku nedošlo k jeho deformaci. Pohybuje se od několika sekund i do několika minut a představuje rozhodující část vstřikovacího cyklu, proto je snaha zkrátit ji na minimum. [4]

#### **2.2.1.3 VSTŘIKOVACÍ TEPLOTA TAVENINY**

Teplota roztaveného plastu je vedle tlaku nejdůležitější veličinou, která ovlivňuje jeho zpracovatelské vlastnosti a která souvisí s konečnými vlastnostmi výrobku. Každý plast lze vstřikovat v určitém rozmezí teplot, které většinou udává výrobce. [4]

Zvyšováním teploty taveniny zvyšujeme její zatékavost, snižujeme orientaci, zmenšujeme tlakové ztráty v dutině formy, snižujeme vliv studených spojů, zvyšujeme obsah krystalického podílu (u semikrystalických plastů) a dobu ochlazování (nevýrazně).

Připravit dávku teplotně homogenní taveniny s rovnoměrnou distribucí případných aditiv před čelem šneku je úkolem plastifikační jednotky vstřikovacího stroje. [2]

#### **2.2.1.4 TEPLOTA FORMY**

Teplotou formy rozumíme teplotu stěny dutiny formy před vstříknutím roztaveného plastu. Po vstříknutí taveniny její teplota roste, ale v důsledku mechanismů odvodu tepla opět klesá na původní hodnotu. Stěnou odchází přes vedení formy do okolí část tepla taveniny. Největší podíl tepla ale odebírá temperační systém formy. Jeho úkolem je tedy vytemperovat formu na pracovní teplotu a na té ji udržet.

Teplota formy ovlivňuje dobu cyklu a jakostní parametry výstřiku. Základní nastavení určuje spodní hranice rozpětí teploty udávané výrobcem plastu.

Zvyšováním teploty stěny formy se: zvyšuje výrobní smrštění, snižuje dodatečné smrštění, zmenšuje dokrystalizace a dosmrštění, zvyšuje kopírovatelnost povrchů tvarové dutiny, zvyšuje délka zatečení taveniny, snižuje orientace, vnitřní pnutí, odpor proti toku taveniny, zlepšují kluzné vlastnosti a rozměrová stabilita, prodlužuje doba ochlazování atd.

Důležitá je nejen teplota stěny formy, ale i její homogenní rozložení po celé ploše povrchu dutiny formy, které musí zajistit vhodná konstrukce temperačního systému. [2]

## 2.2.2 VLASTNOSTI VÝSTŘIKŮ

### Smrštění

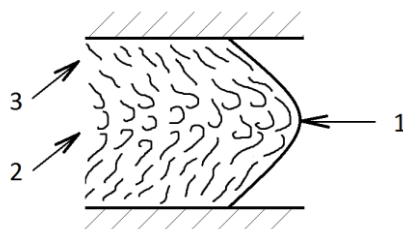
Smrštění výstřiku znamená zmenšení jeho rozměrů při ochlazování ze zpracovatelské teploty na normální teplotu. Rozeznáváme smrštění výrobní (ve formě) a smrštění dodatečné, ke kterému dojde během času.

Amorfny plasty vykazují menší smrštění než plasty semikrystalické. Krystalinita je také příčinou nerovnoměrného smršťování výstřiků.

Pokud chceme výrobek přesného tvaru, musíme upravit dutinu formy podle předpokládaného smrštění, které je většinou udáváno výrobcem. [1]

### Orientace

Ve výstřicích je možno nalézt zamrzlou orientaci makromolekul, která vede k anizotropii výstřiků. Vznik orientace je patrný z obrázku 2.9. Jestliže tavenina polymeru protéká dutinou formy, je rychlost jádra větší než rychlost vnějších vrstev. To je dáno jednak třením taveniny o stěny a jednak zvětšením viskozity těchto vrstev způsobeným chladícím efektem stěn. To vyvolává smykové namáhání, které převádí makromolekuly z formy statistického klubka do napříměné formy. [1]



**Obr. 2.9:** Orientace a protažení polymerních řetězců v oblastech s různými tokovými rychlostmi

1 - Rychlostní tokový profil taveniny

2 - Oblast vyšší teploty, menší viskozity

3 - Oblast nižší teploty, větší viskozity [1]

## 2.2.3 ŘEŠENÍ VTOKOVÉ SOUSTAVY

Vtoková soustava je tvořena jednoduchými nebo složitějšími vtokovými kanály, jejichž úkolem je vytvořit spojení mezi dutinou formy a dutinou tavicí komory. Protože délka kanálů prodlužuje dráhu toku, zvyšují vtokové kanály tlakové ztráty a snižují teplotu taveniny. Proto mají být kanály co nejkratší a jejich průřez má mít optimální tvar, přičemž má být co největší. Nejvhodnější je kanál s kruhovým průřezem.

Pro volbu typu vtoku je důležité ústí kanálu do dutiny formy. Může být řešeno jako plné, bodové, nebo štěrbinové.

Vtokové ústí musí být dimenzováno tak, aby zatuhlo ve vhodnou chvíli a aby doba dotlaku byla optimálně dlouhá. Maximální vnitřní pnutí vzniká v okolí vtoku, čemuž musí odpovídat jeho umístění. To ovlivňuje také vznik studených spojů, orientaci makromolekul, uzavření vzduchu ve výstřiku atd. Vtok se má obecně ústít do místa s nejtlustší stěnou a to tak, aby tavenina naplnila dutinu co nejrychleji a všude ve stejném čase. [4]

### 2.2.3.1 ZÁKLADNÍ DRUHY VTOKŮ A JEJICH VLIV NA PROUDĚNÍ TAVENINY

**Plný vtok (kuželový)** – pro rozměrné a tlustostěnné výstřiky, pro všechny materiály

- + malá tlaková ztráta, malá anizotropie smrštění, malé vnitřní pnutí
- delší výrobní cyklus, obtížné oddělování vtoku

**Bodový vtok** – rychle vyráběné tenkostěnné výstřiky, pro vícenásobný vtok

- + samočinně se odtrhne, nevyžaduje dodatečné zarovnání, krátké časy
- velké tlakové ztráty

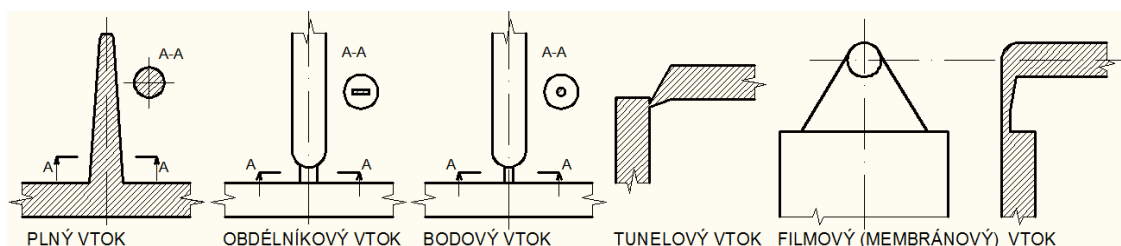
**Tunelový vtok** (zvláštní typ bodového vtoku) – pro dvoudeskové konstrukce forem

**Obdélníkový vtok** – menší tloušťky stěny, při vyšších nárocích na přesnost

- + dobré plnění formy
- nutné dodatečné odstranění vtoku, výraznější tokové čáry u vtoku

**Filmový vtok** – pro ploché a prstencové tvary a pouzdra

- + rovnoměrnější plnění, malé dodatečné smrštění výstřiku
- větší spotřeba materiálu, dodatečné odříznutí vtoku od výstřiku [3]



**Obr. 2.10: Základní druhy vtoků [3]**

## 2.2.4 ŘEŠENÍ TVARU PLASTOVÝCH VÝROBKŮ

Řešení tvaru plastového výrobku musí respektovat následující hlediska:

- **funkčnost** – musí zajistit plnění všech hlavních funkcí po dobu přijatelné životnosti.
- **technologičnost** – je třeba dodržet zásadu plynulého a rychlého plnění formy taveninou. Aplikují se oblé tvary, plynulé přechody. Rohy, hrany, kombinace rovinných a válcových, nebo kuželových nejsou žádoucí, dávají podnět vzniku vad výstřiků.
- **vhodné estetické řešení** – musí být v souladu s funkcí a prostředím, kde bude výrobek používán. Výrobky mají budit dojem lehkosti a ladnosti, s výjimkou konstrukcí při kombinaci plast – kov. Ani zde nejsou ostré rohy, hrany apod. žádoucí.
- **ekonomičnost** – vyžaduje jednoduchost tvaru (levnější formy, úspora materiálu), vhodné jsou tenčí stěny, zaoblení rohů a hran, což je výhodné i z hlediska technologie. [3]

### 2.2.4.1 ZÁSADY KONSTRUKCE PLASTOVÝCH DÍLŮ

Hlediska, která je třeba při konstrukci dílů respektovat, směřují ke stejnému tvarovému pojetí, ze kterého plynou některé následující zásady tvarového řešení. [3]

#### Dělicí rovina

Je to plocha, v níž dosedá jedna část formy na druhou a uzavírá tak tvarovou dutinu formy. Její určení je třeba provést hned při prvním návrhu výrobku, aby bylo vidět, jak se tvar do formy umístí, jak se bude vyhazovat, zda budou použita boční jádra a zda bude vhodné zjednodušení tvaru. Z výrobních důvodů má být jednoduchá. [3]

#### Tloušťka stěn

Měla by být pokud možno malá, aby se předešlo propadlinám nebo staženinám, a aby se zmenšil rozdíl mezi chladnutím jádra a povrchových vrstev taveniny. Minimální tloušťka stěny je určena požadovanou tuhostí, pevností a rozměrností výstřiku.

Stěny by měly mít rovnoměrnou tloušťku v celém modelu. Rovnoměrnost v tloušťce zajistí rovnoměrnou rychlost proudu taveniny, rovnoměrné chladnutí výstřiku, rovnoměrné smrštění a minimální vnitřní pnutí. Je-li změna tloušťky nezbytná, měla by být co nejplynulejší. [3]

## Zaoblení

Oblé tvary jsou vhodné z hlediska snazšího proudění taveniny. Čím větší poloměr zaoblení, tím menší jsou hydraulické odpory proti průtoku taveniny a tím menší koncentrace napětí v místě ohybu. Vnější rádius bývá o tloušťku stěny větší než vnitřní rádius, takže je stěna v celém průběhu zakřivení stejně tlustá. [3]

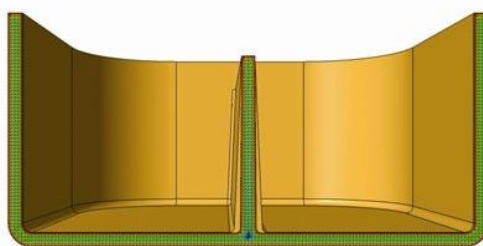
Obecně se dodržuje pravidlo, že vnitřní zaoblení má minimální poloměr o velikosti poloviny tloušťky stěny a vnější zaoblení 1,5 násobek tloušťky stěny. Pokud to konstrukce dovoluje, poloměry mohou být i větší. [9]

## Úkosy

Úkosy jsou vhodné pro snazší vyjímání výstřiků z formy. Všechny stěny dílu rovnoběžné se stěnou formy by měly být opatřeny úkosy. Je možné díl zaformovat s nulovým nebo dokonce záporným úkosem za využití čelistí a vyhazovačů. Tyto postupy ale výrazně zvyšují složitost a cenu formy.

V případě hladkých povrchů se doporučuje minimální úhel úkosu  $0,5^\circ$  na každé stěně. Úkosový úhel  $1^\circ$  už umožňuje snadné vyjmutí pro většinu povrchů.

Velmi důležitým aspektem je také hloubka úkosu, protože např. úkos o velikosti  $1^\circ$  zvětší tloušťku stěny na hloubce 100 mm o 1,75 mm na každé straně (obr. 2.11), což je nežádoucí z důvodů uvedených výše. [3, 9]



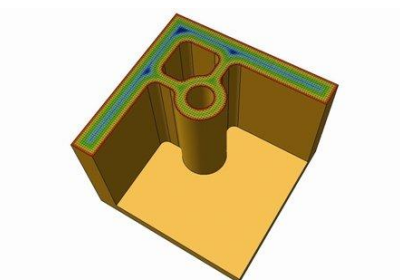
**Obr. 2.11:** Vliv úkosu na tloušťku stěny [9]

## Konstrukce žeber

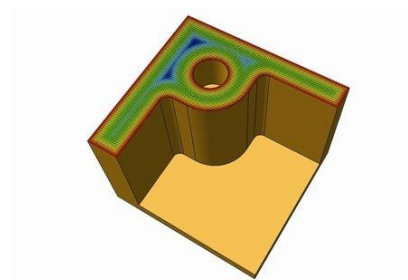
Žebra se používají k vyztužení výstřiků a umožňují použít tenké stěny. Jejich profil musí mít určitý vztah k tloušťce stěny, aby nenastaly nežádoucí deformace. Tloušťka žebra má mezi 60-80 procenty tloušťky stěny. Maximální výška by neměla být větší než trojnásobek tloušťky stěny. Neměla by se kombinovat tenká a silná žebra a vzdálenosti mezi nimi by neměly být větší než dvojnásobek nominální tloušťky stěny. Hrany žeber by měly být zaoblené, a to o poloměru ne větším, než je polovina tloušťky žebra. Pokud to designové hledisko dovoluje, je vhodné použít křížení žeber, protože poskytuje větší stabilitu a rovnoměrnější rozložení napětí. [9]

## Konstrukce úchytů

Výstupky a úchyty pro průchozí nebo závrtné šrouby mají být provedeny tak, aby nedošlo k hromadění materiálu nebo ulomení výstupku od výrobku. Abychom předešli vzniklým vadám, měli bychom dodržovat následující pravidla: tloušťka úchyty by neměla být větší než 60 % nominální tloušťky stěny, výška ne větší než 2,5 násobek průměru díry v úchytu, vysoké můstky úchytů pomáhají tečení materiálu a jeho odvodu, úchyty neumísťovat do rohů stěn (dochází ke zhutnění materiálu – obr. 2.12 a 2.13) [3, 9]



**Obr. 2.12:** Vhodná varianta konstrukce úchyty [9]

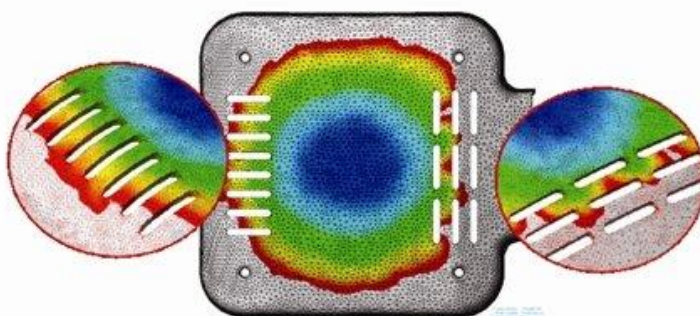


**Obr. 2.13:** Nevhodná konstrukce v rohu stěn [9]

## Umístění vtoků

Vhodným umístěním vtoku lze zásadně ovlivnit tok materiálu a vznik vad, jako jsou studené spoje, smrštění, kvalita povrchu nebo zvlnění.

Většinou se vtok umísťuje do nejtlustšího místa dílu a to tak, aby nedošlo k propadu povrchu v důsledku nedostatečného stlačení materiálu. Dále aby se neselekaly dva proudy taveniny při obtékání překážek a nevznikaly tak potenciální studené spoje. Tyto oblasti jsou pak náchylnější k praskání pod zatížením. Složité formy vždy obsahují oblasti těchto spojů, a pokud jejich množství není možné minimalizovat, měly by být umístěny do méně kritických oblastí dílu. [9]



**Obr. 2.14:** Analýza vtoků [9]

## 2.2.5 VADY VÝSTŘIKŮ

I přes veškeré znalosti o vstřikovaném materiálu, konstrukci dílů, přes vysokou úroveň vstřikovacích strojů a stále se zlepšující úroveň simulačních programů se stále setkáváme s výstřiky vykazujícími vady. To znamená, že výrobky nejsou shodné s požadavky na ně kladenými.

Všechny vady mají určitou příčinu a lze je nějakým způsobem odstranit. Nejčastějšími zdroji vad jsou nesprávná konstrukce dílu, nesprávné umístění vtoku, nebo nevhodně zvolené vstřikovací parametry. [10]

### 2.2.5.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ VAD

- **Vady zjevné** – je možné je identifikovat vizuálním porovnáním
  - *Vady tvaru* – nedostřiky, propadliny, přetoky, otřepy...
  - *Vady povrchu* – změny v lesku, stopy po vlhkosti...
- **Vady skryté** – nelze vizuálně zjistit, ovlivňují vlastnosti výstřiků, jsou to např.: vnitřní pnutí, studené spoje, anizotropie vlastností

Příčinou vzniku těchto vad mohou být: konstrukce dílu, formy, vstřikovací stroj, vstřikovaný polymer nebo vstřikovací parametry. [10]

### 2.2.5.2 VADY A JEJICH PŘÍČINY

#### Studené spoje

Vznikají vždy v místech, kde tavenina musela obtékat překážku, kde tavenina byla vstřikována do formy dvěma nebo více vtoky a následně se střetávalo více toků taveniny. Projevují se zřetelnou a viditelnou spojnici dvou čel taveniny plastu. V těchto místech má výstřik odlišné vlastnosti, nežli v místech ostatních.

Pro eliminaci studených spojů je důležitá vhodná konstrukce dílu a umístění vtokové soustavy. K odstranění může také pomoci zvýšení teploty taveniny  $T_t$ , teploty formy, dotlaku a nebo rychlosti vstřikování. V krajním případě použít jiný materiál. [5]

#### Propadliny, staženiny, lunkry, zvlnění povrchu

Jsou to tvarové vady výstřiku. Vznikají při nerovnoměrné, nebo příliš velké tloušťce stěn dílu, v místech nahromadění materiálu, v místech umístění žeber, nebo při špatné konstrukci temperačního systému (nerovnoměrné chlazení). [5]

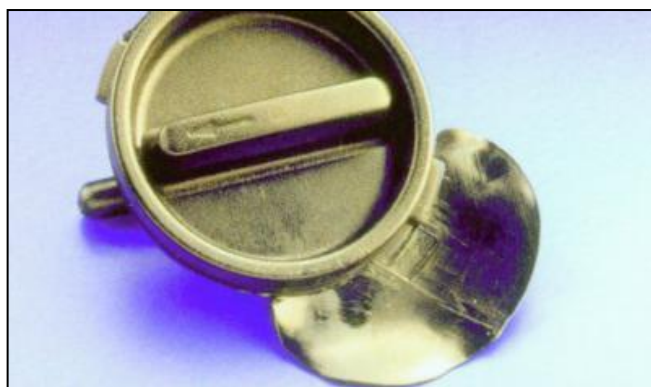
Lze je eliminovat změnou vtoku, modifikací materiálu nadouvadly nebo minerálními plnivy, změnou konstrukce výstřiku, nebo změnou vstřikovacích parametrů, především velikosti dotlaku. [11]

### **Přetoky (přestřiky) a neúplné výstřiky**

Materiál vyteče ven z formy v oblasti kanálů, dělicích rovin a vyhazovačů (vzniknou otřepy – přetoky), nebo naopak nedoteče, ztuhne a nevyplní celou dutinu formy (neúplné výrobky).

Za vznik přestřiků může špatné těsnění ploch formy, nedostatečná uzavírací síla formy, příliš vysoký tlak ve formě, nebo malá viskozita hmoty.

Neúplné výstřiky mohou být způsobeny příliš malou dávkou plastu, omezeným tokem taveniny vlivem nedostatečného odvzdušnění formy, nedostačujícím tlakem stroje, nebo předčasným zatuhnutím vtokového systému. [5]



***Obr. 2.15: Přetok na výstřiku [11]***

### **Rozdíly v lesku**

Výrobky mohou vykazovat příliš vysoký lesk, resp. malý lesk, nebo na povrchu nemají jednotný lesk. Příčinou je reflektující vlastnost povrchu dílu vůči dopadajícímu světlu. Málo drsné plochy mají větší lesk, než plochy drsnější. Příčinou rozdílu lesku je rozdílné zobrazovací chování plastu na stěně formy, které je způsobeno rozdílnými poměry ochlazování nebo rozdíly smrštění.

Možnosti odstranění se liší podle toho, kde se rozdíl lesku objeví. Může pomoci změna vstřikovacích parametrů, změna struktury povrchu, změna umístění vtoku nebo změna tvaru výrobku. [5]

### **Místní spálení materiálů (diesel efekt)**

Na povrchu výrobku se jeví jako spáleniny a patrné černé zbarvení. Příčinou Dieselova efektu neboli místního spálení materiálu je stlačení vzduchu, který se nepovedlo odstranit, čímž nastává jeho ohřev a způsobuje místní degradaci materiálu (krajně i spálení). [10]

Pro jeho odstranění je třeba zajistit lepší odvzdušnění formy (čistota odvzdušňovacích spár a vůlí u pohyblivých částí formy) nebo snížit uzavírací sílu. [5]



### **Kresba po volném proudu taveniny (meandrový tok)**

Vzniká při nevhodné konstrukci a umístění vtoku, zejména u amorfních termoplastů. Opět je to kombinace vady pevnostní a vzhledové.

Odstranění této vady bývá velmi složité. Většinou je však nutné umístit ústí vtoku tak, aby tavenina při vstupu do dutiny formy narazila na stěnu a pokračovalo klasické plnění, popř. vytvořit umělou překážku (zakomponovat jádro nebo kolík). [10]

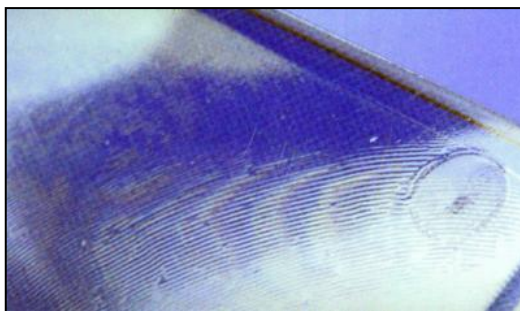


**Obr. 2.16:** Stopy po volném proudu taveniny [10]

### **Efekt gramofonové desky**

Na povrchu výrobku se projevuje jako jemné drážkování, podobné jako se vyskytuje na povrchu gramofonových desek.

Příčinou bývá nízká teplota taveniny, nízká vstřikovací rychlost nebo nízká teplota stěny formy. [12]



**Obr. 2.17:** Vzhled gramofonové desky [12]

### **Další vady:**

V praxi se vyskytuje obrovské množství dalších vad. V této práci není prostor na to je všechny popsat, proto budou jen stručně uvedeny důvody některých dalších vad:

- *Tmavé body na povrchu* – znečištění granulátu nebo vtokové soustavy
- *Vlhkostní šmouhy* – špatné vysušení granulátu, špatné skladování
- *Uzavřené bubliny* – zbytková vlhkost v granulátu, vysoká vlhkost taveniny
- *Tokové čáry* – pomalý proud taveniny, špatný index toku taveniny [2]

## 2.3 POČÍTAČOVÁ SIMULACE V PRAXI

V současné době lze dosáhnout maximální efektivity výroby jedině s využíváním nových technologií a plného zapojení počítačové podpory technologie do praxe. Bez využívání těchto trendů růstu průmyslu by nebyl výrobce dílů v současné době konkurenceschopný. [16]

Složitost vstřikovaných dílů, požadavky na jejich kvalitu a přesnost, výrobní náklady, ale i tlak způsobený konkurenčními výrobci nás nutí odhalit případné chyby vstřikovacího procesu již ve fázi vývoje dílu a formy. Nástrojem pro vyhodnocování a optimalizaci plastového dílu, formy a vstřikovacího procesu ještě před tím, než začne vlastní výroba, jsou simulační programy. Procesní simulace se podílejí nejen na odhalování chyb a nedostatků konstrukcí plastových dílců a konstrukcí forem, ale pomáhají také stanovit optimální technologické parametry či získat výpočtové podklady pro návrh opatření vedoucích k minimalizaci technických rizik, ke snížení doby výrobního cyklu a mnohem přesnějšímu stanovení výrobních nákladů. [15]

## 2.4 SIMULAČNÍ SOFTWARE CADMOULD 3D-F

Cadmould 3D-F je celosvětově nejprodávanější software pro simulaci vstřikování plastů od německé firmy Simcon. Jeho kvalita simulace je pravidelně kontrolována a optimalizována podle reálných vstřikovacích studií, díky čemuž je schopen splňovat nejmodernější požadavky praktické práce. [14]

Základním formátem využívaným simulační analýzou Cadmould je STL. Do tohoto formátu je třeba převést konstrukci dílu, který byl určen pro analýzu. Po nahrání dílu ve formátu STL nám Cadmould automaticky vytvoří speciální výpočtovou síť konečných prvků. Software je vybaven velmi dobrými prostředky pro opravu STL dílu, ale i přesto je vhodné použít soubor bez závažnějších chyb, jako jsou nespojitosti nebo vnořené falešné konstrukce, které nám následně způsobují vady na vytvořené síti.

Přímo v softwaru lze vytvořit vtokový i temperační systém. K tomuto účelu má k dispozici chytře připravené konstrukční prostředky. Systémy lze ale i přenést ve formě funkčních os v CAD formátu a následně je jen „obalit“ kanály.

Pokud jde o materiál dílce, Cadmould má k dispozici rozsáhlou databázi plastů, kterou lze ještě dále doplňovat. Stačí pouze vybrat vhodný materiál podle obchodního názvu, typu, nebo lze nahlédnout do základních materiálových dat.

Před spuštěním samotné analýzy je třeba zadat technologické parametry vstřikování nebo vybrat doporučené nastavení softwaru pro daný materiál a součást. [15]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 POPIS FUNKCE SIMULOVANÉHO DÍLU

Díl určený pro optimalizaci plní funkci držáku sluneční clony umístěné v interiéru automobilu nad předním oknem. Clona má chránit obličej řidiče a spolujezdce před přímým slunečním svitem. Je sklopitelná a do držáku je upevněna pomocí válcového čepu, který do jeho horní části konstrukce pružně zaskakuje. Čep je možné z držáku „odcvaknout“ a clonu odklopit na boční okno. Jedná se o díl pohledový. Jeho povrch je tvořen jemným dezénem, který však na průběh technologie nemá výrazný vliv.



*Obr. 3.1: Čep clony upevněný v držáku*

#### 3.2 VOLBA MATERIÁLU

Z funkčního hlediska jsou strojírenské výrobky podrobeny různým nárokům. Nejčastěji to bývají požadavky určité pevnosti při statickém nebo dynamickém namáhání krátkodobém či dlouhodobém, požadavky tuhosti, pružnosti nebo deformovatelnosti. K tomu někdy přistupuje působení zvýšených teplot, mrazu, vlhkosti, záření, chemikálií a vyžaduje se dodržení určitých rozměrových tolerancí. Aby byl výrobek vůbec rentabilní, tak je podmínkou i určitá funkční životnost.

Při volbě materiálu je třeba vzít v úvahu vedle vlastností a ceny také jeho zpracovatelnost. Špatně zpracovatelný materiál může být příčinou toho, že i při dokonalé technologii zůstanou vlastnosti výrobku hluboko pod hodnotami uváděným v prospektech a materiálových listech. [3]

##### 3.2.1 CHARAKTERISTIKA ZVOLENÉHO MATERIÁLU

Na výrobu byl zvolen materiál s obchodním označením Hostaform C9021 LS. Jedná se o polyoxymethylén (POM), což je semikrystalický termoplast s vysokým podílem krystalinity. Je velmi tuhý, pevný a má vysokou rázovou houževnatost. Vrubová houževnatost je nižší, ale zůstává stejná až do teplot  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . POM je pružný a má dobrou mez únavy. Koeficient tření za sucha je nízký a ošetrivost velmi dobrá. Trvalá teplotní odolnost je do  $85\text{ až }95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hůře odolává horké vodě a jeho chemická

odolnost je dobrá proti slabým kyselinám, zásadám, rozpouštědlům, benzínu a olejům. Svými mechanickými vlastnostmi je vhodný pro konstrukční aplikace.

Zpracovatelnost je horší než u polyamidu (PA), protože POM má nižší tekutost a sklon k degradaci při zpracování. Používá se na vstřikování nebo vytlačování, a to na výrobu malých součástí s vysokou pevností, jako jsou příchytky nebo klíčky. [3]

POM se dodává jako homopolymer nebo kopolymer. V našem případě se jedná o kopolymer. Ten má mírně nižší krystalinitu, a tím i mechanické vlastnosti, ale lepší odolnost proti horké vodě a lepší zpracovatelnost.

Hostaform je obchodní název řady acetalových kopolymerů firmy Ticona. Označení LS v názvu materiálu ho řadí do speciální kategorie typů materiálu Hostaform. Tento typ má střední rychlost tečení a zvýšenou odolnost proti UV záření díky přidaným UV stabilizátorům. [13]

### 3.3 VÝSLEDKY VSTŘIKOVÁNÍ DO PŮVODNÍ KONSTRUKCE FORMY

Od výrobce dílu byly k dispozici výsledky vstřikování do původní konstrukce formy. Na hotovém výrobku se vyskytovalo několik vzhledových i pevnostních vad. Jednalo se především o výrazné propadliny na zadní straně dílu, viditelné studené spoje, hlavně na přední stěně a bocích, a v neposlední řadě o vady lesku. Nová konstrukce formy by měla tyto vady odstranit nebo jejich výskyt alespoň podstatně snížit.



**Obr. 3.2:** Studené spoje na bocích dílu



**Obr. 3.3:** Vady lesku na zádech dílu

Dále byl k dispozici model původní varianty konstrukce ve formátu STEP. Tento model bylo třeba převést do STL formátu a podrobit ho simulaci vstřikovacího procesu ke zjištění výskytu a rozsahu vad. Výsledky simulace ukázaly přesná místa vzniku propadlin i studených spojů. Dále z nich vyplynul fakt, že původní umístění vtokového ústí nebylo vhodné. Na základě těchto výsledků byl původní model v několika krocích, vždy doprovázených simulačními analýzami a zhodnocením vlivu změn na výskyt vad, konstrukčně upraven. Zároveň s úpravami byla nalezena vhodná poloha pro ústí vtoku. Posledním krokem bylo na tvarově optimalizovaném dílu upravit samotné vstřikovací podmínky.

### 3.4 SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ PRVNÍ VARIANTY KONSTRUKCE

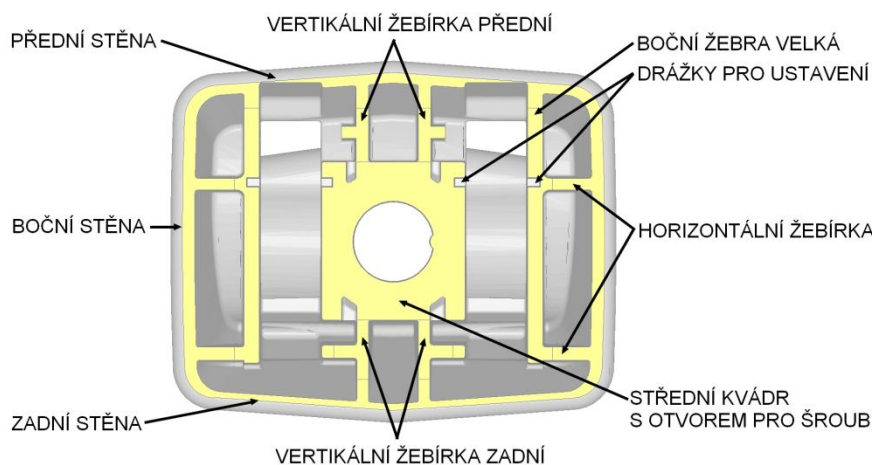
Konstrukce držáku může být z hlediska úprav rozdělena na horní a dolní polovinu. Horní část slouží k pružnému zaskočení čepu a upevnění sluneční clony k držáku. Je v ní průchozí otvor pro šroub, který se uzavírá krytkou. Tato část má daný tvar a nelze do ní konstrukčně příliš zasahovat. Oproti tomu spodní polovinu lze do určité míry upravit a ovlivnit tak plnění dutiny formy, chlazení výstřiku a tím i vznik vad. Tato část dílu je tvořena čtyřmi obvodovými stěnami, mezi kterými je uprostřed kvádr s otvorem pro šroub. Boční stěny tohoto kvádru jsou opatřeny drážkami, které slouží k ustavení držáku v interiéru automobilu. Po obou stranách kvádru jsou velká boční žebra se stejnými drážkami. Kvádr s otvorem i velká žebra jsou napojena menšími žebírky na okolní stěny.

#### Popis konstrukce

Na první variantě modelu (obr. 3.4) byla velká boční žebra napojena pouze na přední stěnu a dále dvěma horizontálními žebírky na stěny boční.

Kvádr byl opatřen zářezy, které měly zeslabit jeho stěny, zajistit rovnoměrnější smršťování při ochlazování a lepší obtékání otvoru uprostřed taveninou. Dále byl ještě spojen dvěma vertikálními žebírky s přední i zadní stěnou dílu.

Přední stěna neměla konstantní tloušťku. Na každé straně byla opatřena drážkou, která ji nerovnoměrně zeslabovala z 2 mm až na tloušťku 1 mm v nejslabším místě. Boční stěny byly silné 2 mm, zatímco stěna zadní pouze 1,6 mm.



**Obr. 3.4:** Popis konstrukčně variabilní spodní poloviny dílu

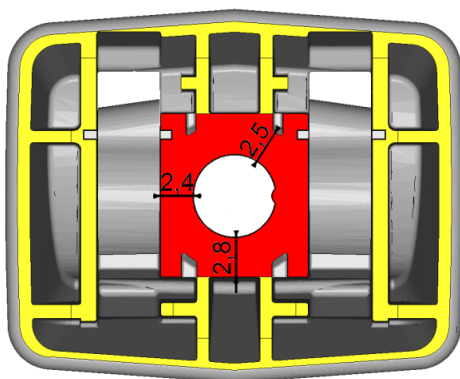
Vznik propadlin bylo možné vzhledem ke konstrukci výstřiku předpokládat na středním kvádru s otvorem. Stěny okolo tohoto otvoru jsou příliš silné a nemají po celém obvodu stejnou tloušťku (obr. 3.5).

### 3.4.1 VSTUPNÍ PARAMETRY SIMULACE

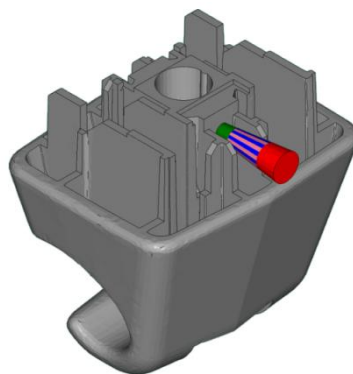
#### Volba a umístění vtoku

Před zahájením simulace byl jako vhodný shledán bodový vtok, který se používá pro menší, tenkostěnné výstřiky, u kterých se tolik neprojeví jeho tlakové ztráty. Výhodou tohoto vtoku je omezený vznik tokových čar na povrchu dílu a jeho samočinné oddělení od výrobku. Poloha jeho ústí byla známa spolu s původní konstrukcí modelu. Při jejím určování bylo vycházeno ze zásady umístění vtoku do nejsilnějšího místa na součásti. Tedy do zadní plochy středního kvádru (obr. 3.6). Rozměry vtokového ústí se volí v rozmezí 50 až 70 % tloušťky stěny, do které je vtok umístěn. Zbytek vtokových kanálů nebylo pro účely této práce třeba modelovat, protože nedostatky konstrukce se projeví i při přímém plnění dutiny vtokovým ústím.

I bez provedení simulace vstřikování bylo možné říci, že v tomto případě se proud taveniny při plnění dutiny formy rozdělí, obteče otvor a následně se za ním spojí. Další dvě čela taveniny se budou spojovat mezi vertikálními žebry na přední i zadní stěně. V těchto místech lze očekávat vznik studených spojů. Ty se pravděpodobně objeví i na bocích dílu, kde se budou stékat proudy taveniny ze zadní a přední stěny.



**Obr. 3.5:** Nerovnoměrná síla stěny okolo otvoru pro šroub



**Obr. 3.6:** Umístění vtokového ústí

#### Volba materiálu

Z obsáhlé databáze materiálů byl vybrán zvolený termoplast POM Hostaform C9021 LS. Doporučené nastavení teploty formy je výrobcem materiálu udáváno v rozmezí 80-120 °C, teploty taveniny pak v rozmezí 180-220 °C.

#### Vstřikovací podmínky

Protože před vstřikováním nebyly známy optimální vstřikovací parametry ani nebyly zadány parametry vstřikovacího stroje, byla při jejich volbě zvolena možnost „default“, kdy program automaticky sám tyto parametry navrhne v závislosti na zvoleném materiálu, objemnosti dílu a tloušťce jeho stěn. Tyto parametry jsou zapsány v tab. 3.1.

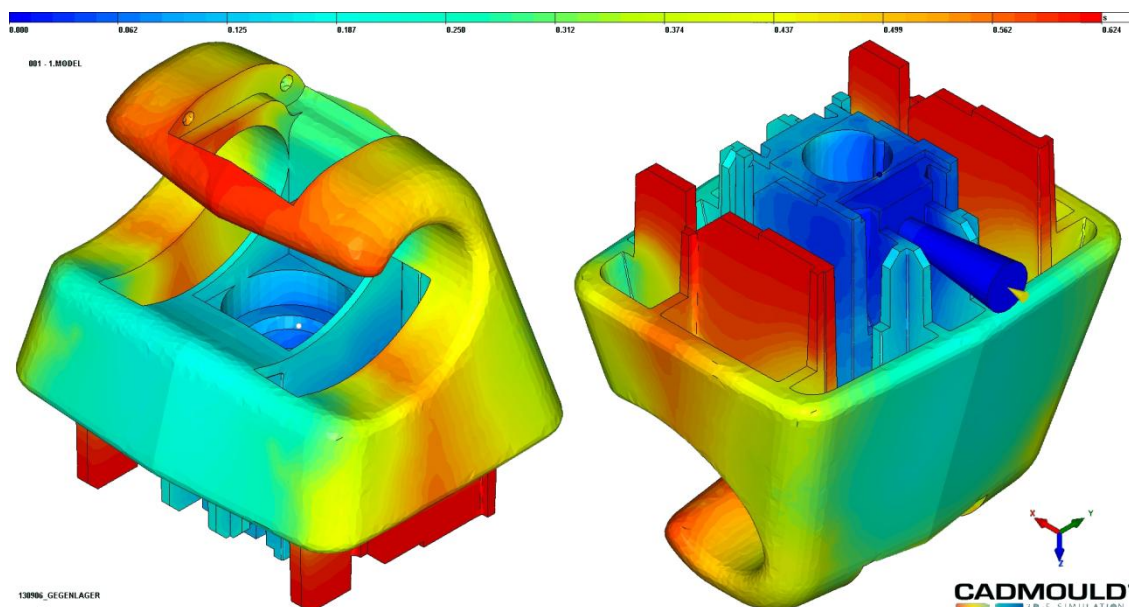


**Tab. 3.1:** Programem navržené vstřikovací parametry pro původní díl.

Parametr	Jednotky	Hodnota
Doba plnění $t_v$	[s]	0,603
Doba dotlaku $t_d$	[s]	4
Velikost dotlaku	[bar]	900
Doba chlazení $t_{ch}$	[s]	11,5
Teplota taveniny	[°C]	210
Teplota stěny formy	[°C]	90

### 3.4.2 VÝSLEDKY SIMULACE

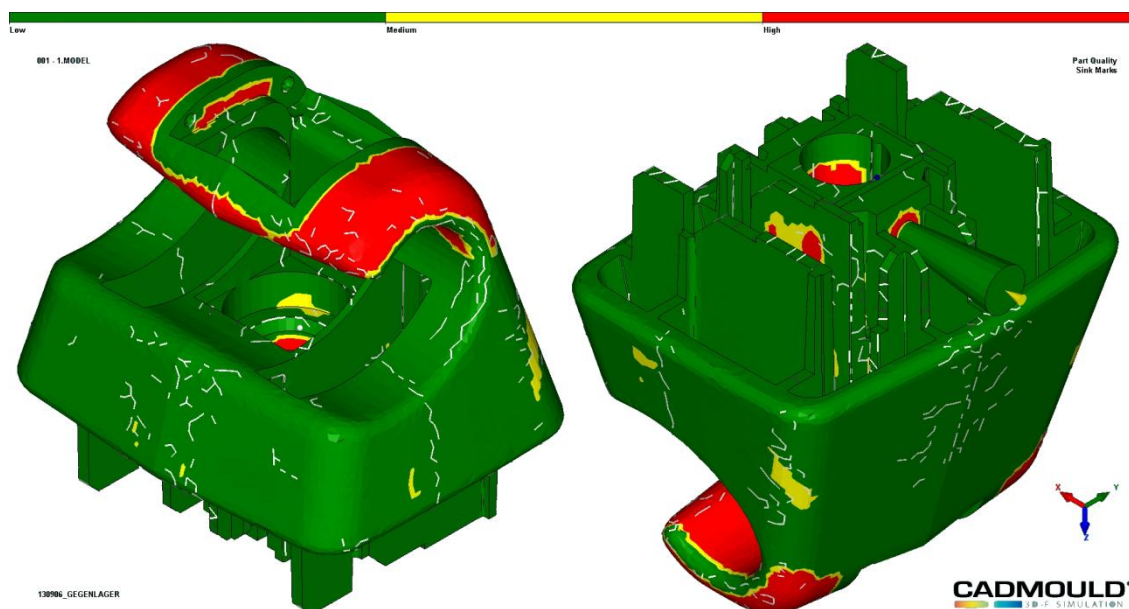
Na obrázku 3.7 je zobrazen výsledek časového plnění dutiny formy ve dvou pohledech na součást. Nad ní je umístěna barevně rozdělená časová osa. Z obrázku je zřejmé, že jako první se plnil střední kvádr, kde byl umístěn vtok. Dále se dvojitými vertikálními žebírky na přední a zadní straně kvádru naplnila přední a zadní obvodová stěna. Proudby taveniny z těchto dvou stěn pokračovaly zároveň na horní část pro upevnění čepu a na boční stěny dílu, kde se čela taveniny spojila. Z těchto stěn se pak jako poslední plnila velká boční žebra. Naplnění celé dutiny trvalo přesně 0,624 sekundy. Celková doba cyklu až do vyhození výstřiku z formy byla vypočtena na 12,1 s.



**Obr. 3.7:** Výsledky simulace vstřikování první varianty konstrukce – čas plnění

Výsledky simulace v oblasti propadlin a studených spojů (obr. 3.8) potvrdily domněnku o vzniku spojů na přední, zadní a bočních stranách dílu. Na obrázku jsou studené spoje znázorněny jako bílé čáry.

Na středním kvádru opravdu došlo ke vzniku výrazných propadlin. Další se objevily na čelní stěně, bočních stěnách, na zaoblených rozích a horní části pro upevnění čepu. Celková plocha propadlin tvořila přibližně 11,2 % povrchu dílu. Na obrázku jsou velké propadliny vyobrazeny červenou barvou, středně velké žlutou barvou a bezproblémové partie barvou zelenou.



**Obr. 3.8:** Výsledky simulace vstřikování první varianty konstrukce – propadliny a studené spoje

### 3.4.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE

Drobné propadliny vzniklé na přední stěně byly s velkou pravděpodobností zapříčiněny její nerovnoměrnou tloušťkou způsobenou drážkami v ní umístěnými. Propadliny na bočních stěnách mohly být způsobeny rozdílnou tloušťkou těchto stěn od ostatních obvodových stěn nebo také příliš velkou vzdáleností vtokového ústí od těchto míst. Na středním kvádru, jak bylo již výše zmíněno, byl vznik propadlin způsoben příliš velkým množstvím materiálu okolo otvoru. Propadliny na horní části pro čep byly zapříčiněny špatnou konstrukcí této partie. Jejich odstranění by vyžadovalo úpravy, které by způsobily výraznější změnu designu dílu, což není možné. Z tohoto důvodu bude horní oblast ponechána v současné podobě a změny v rámci optimalizace se jí vyhnou.

Výrazné studené spoje na bocích, přední stěně a na zádech dílu byly způsobeny nevhodným umístěním vtoku. Toto umístění do středu dílu sice do jisté míry vyrovnalo propadliny v nejsilnějším místě, ale způsobilo vznik výrazných studených spojů na bočních stěnách. Spoje, které vznikly na přední a zadní stěně, byly způsobeny paralelním uspořádáním vertikálních žebër spojujících střední kvádr s oběma stěnami. Díky tomuto zdvojení se při plnění dutiny formy na obou stranách dílu mezi žebry stékaly čela taveniny, což mělo za následek vznik zmíněných spojů.



### 3.5 SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ DRUHÉ VARIANTY KONSTRUKCE

#### Optimalizace konstrukce

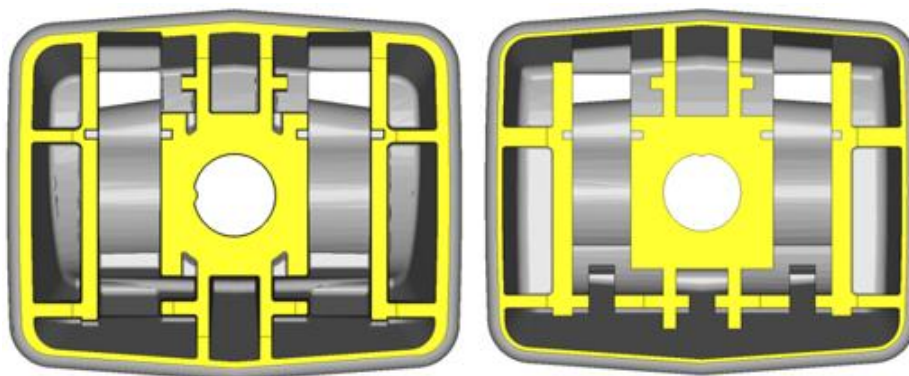
Původní varianta modelu prošla z důvodu výskytu vad následujícími úpravami, které měly nedostatky zmírnit (obr 3.9).

Kvůli vzniku propadlin byly upraveny všechny čtyři obvodové stěny na konstantní tloušťku 1,5 mm po celém obvodu dílu. Drážky, které zeslabovaly přední stěnu, byly odstraněny.

Velká boční žebra byla oddělena od přední stěny. Kvůli jejich lepšímu plnění taveninou byla vrchní horizontální žebírka zesílena na stejnou hodnotu jako obvodové stěny, tedy na 1,5 mm. Drážky pro upevnění dílu do interiéru bylo možné díky přidané síle stěn velkých žebér částečně vyplnit, což žebřům přidá na tuhosti.

Významnou konstrukční změnou, která měla výrazně ovlivnit způsob plnění dutiny formy, a tím vznik studených spojů, byla změna konstrukce stropu dutiny se žebry. Ten byl upraven tak, aby se přímo napojoval na zadní stěnu a aby skrze něj probíhalo její plnění. Proto byla zkrácena a od zadní stěny oddělena vertikální žebírka.

Poslední úpravou bylo odstranění zbytečných zářezů ve středním kvádru, které neplnily svou funkci snížení výskytu propadlin.



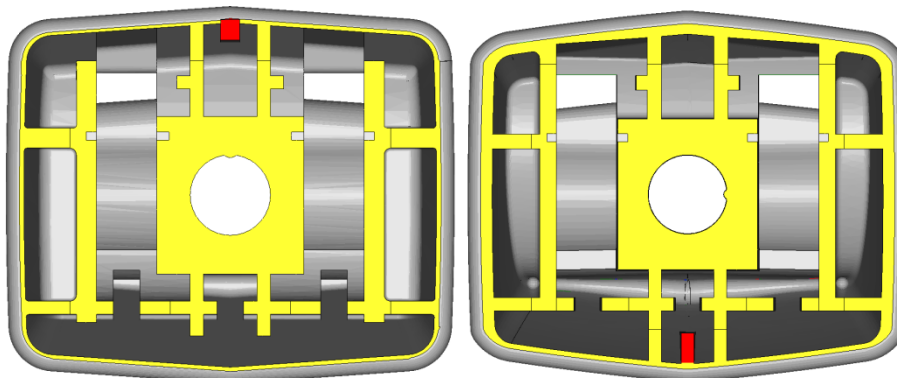
**Obr. 3.9:** První varianta modelu (vlevo) a druhá varianta modelu (vpravo)

#### 3.5.1 VSTUPNÍ PARAMETRY SIMULACE

##### Umístění vtokového ústí

V předchozí simulaci se ukázalo umístění vtokového ústí do kvádru jako nevhodné. Nová varianta modelu nabízela celkem tři přijatelné možnosti kam vtok umístit. A to, jako v předchozím případě, do středního kvádru, dále do přidaného žebírka na přední stěně, nebo do žebírka na stěně zadní (obr 3.10). Protože nebylo možné předem určit, která poloha ústí vtoku zajistí nejlepší výsledky, byly simulaci podrobeny všechny tři. Možnost s vtokem ve středním kvádru měla sloužit ke zhodnocení vlivu provedených konstrukčních změn na výskyt vad beze změny polohy ústí. Vtok byl pouze nepatrně

posunut do horní plochy kvádrů kvůli lepšímu plnění zadní stěny skrze novou konstrukci stropu. Simulace zbylých dvou možností, tedy plnění přední a zadní stěnou, měly najít vhodnější umístění vtokového ústí, než bylo to původní.



**Obr. 3.10:** Žebro (červeně) přidané z důvodu umístění vtokového ústí na přední a zadní stěnu

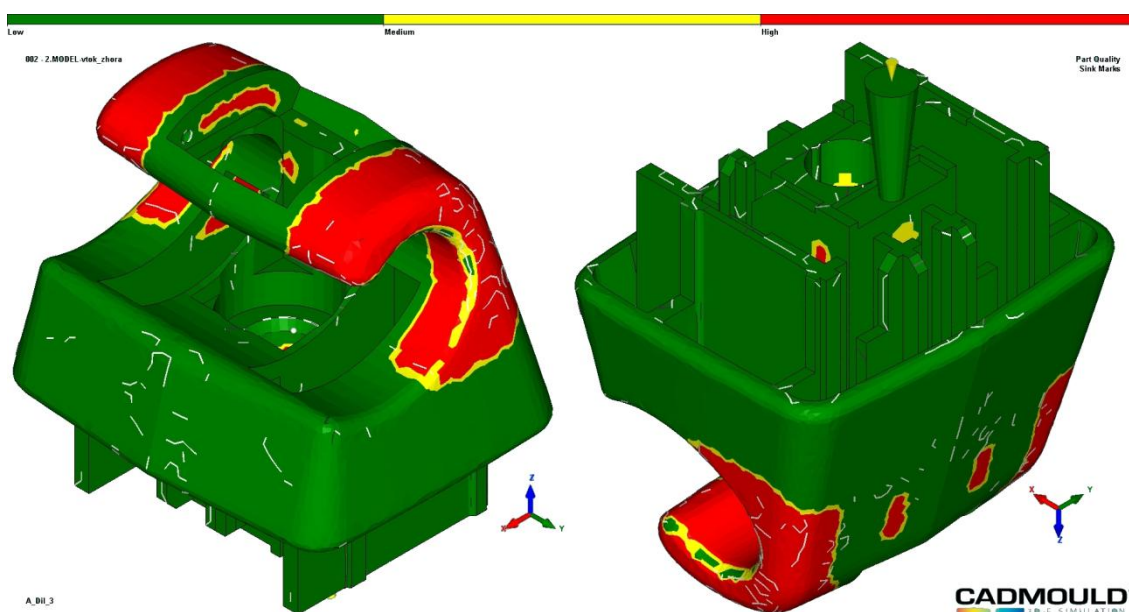
### Vstřikovací podmínky

Pro všechny tři možnosti simulace byly opět použity vstřikovací podmínky z tab. 3.1.

### 3.5.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ

#### Vtok umístěn do horní plochy kvádrů s otvorem

Na obr. 3.11 je výsledek simulace vstřikování druhé varianty modelu. V tomto případě byl bodový vtok, skoro shodně s původní variantou, umístěn do horní plochy středního kvádrů s otvorem.



**Obr. 3.11:** Výsledky simulace vstřikování - propadliny a studené spoje (vtok uprostřed)

Analýza ukázala, že konstrukčními změnami na modelu bylo dosaženo výrazného zlepšení ve výskytu studených spojů. Ty byly na bočních stěnách úplně odstraněny a na přední a zadní stěně výrazně zmenšeny. K mnohem menšímu výskytu studených spojů došlo také na vnitřních žebrech a středním kvádru. Protože se ale jedná především o vadu vzhledu, tak na skrytých partiích není toto zlepšení důležité.

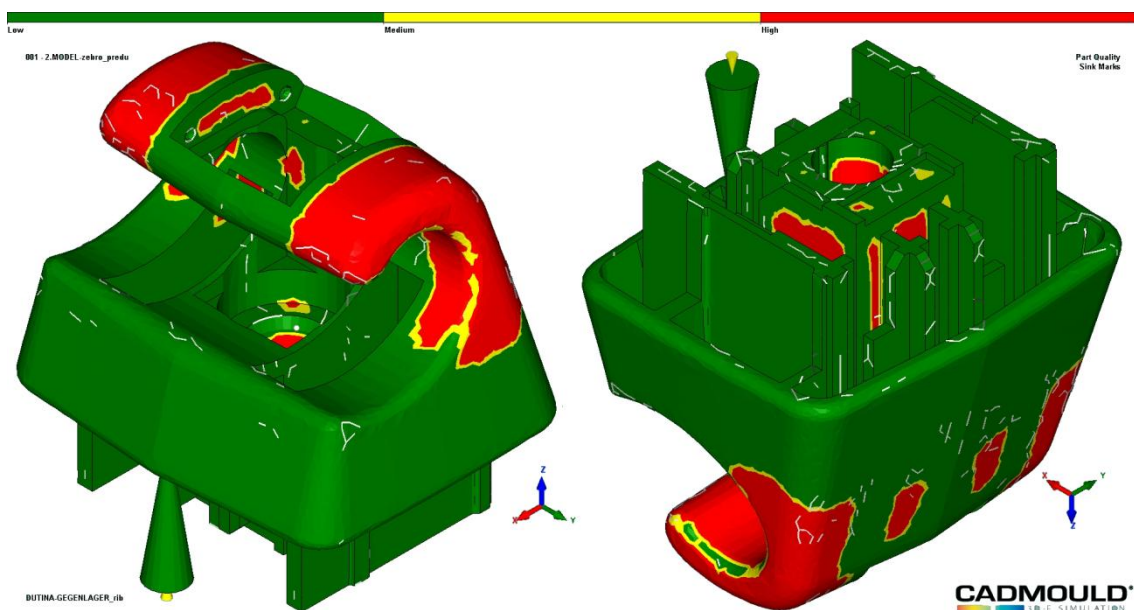
Z hlediska propadlin ale tento model dílu nepřinesl žádná výrazná zlepšení. Díky drobné změně umístění vtoku do horní plochy kvádru se zmenšil výskyt propadlin právě v této oblasti. Změnou tloušťky obvodových stěn se podařilo odstranit všechny propadliny po obvodu dílu. Zhoršení se objevilo na vrchní části pro upevnění čepu a nové velké propadliny vznikly na zadní stěně.

### Vtok umístěn do žebra na přední stěně dílu

Obrázek 3.12 zobrazuje výsledek simulace vstřikování totožného dílu, ovšem s ústím vtoku umístěným do malého žebírka přidaného na přední stěnu.

Toto umístění vtoku téměř odstranilo studené spoje na přední a bočních stěnách dílu. Spoje na zadní stěně vznikly v podobném rozsahu jako při předchozím umístění vtoku. Horší studené spoje se vyskytly na středním kvádru. Ovšem jak již bylo zmíněno výše, zde je tato vada zanedbatelná.

Provedená změna polohy ústí vtoku nepřinesla zlepšení v oblasti propadlin. Jejich výskyt byl téměř stejný, jako při původním umístění vtoku, ovšem s výrazným zhoršením na středním kvádru. Důvodem bylo nedostatečné dotlačení smršťujícího se materiálu ve fázi dotlaku do příliš silných stěn kvádru.



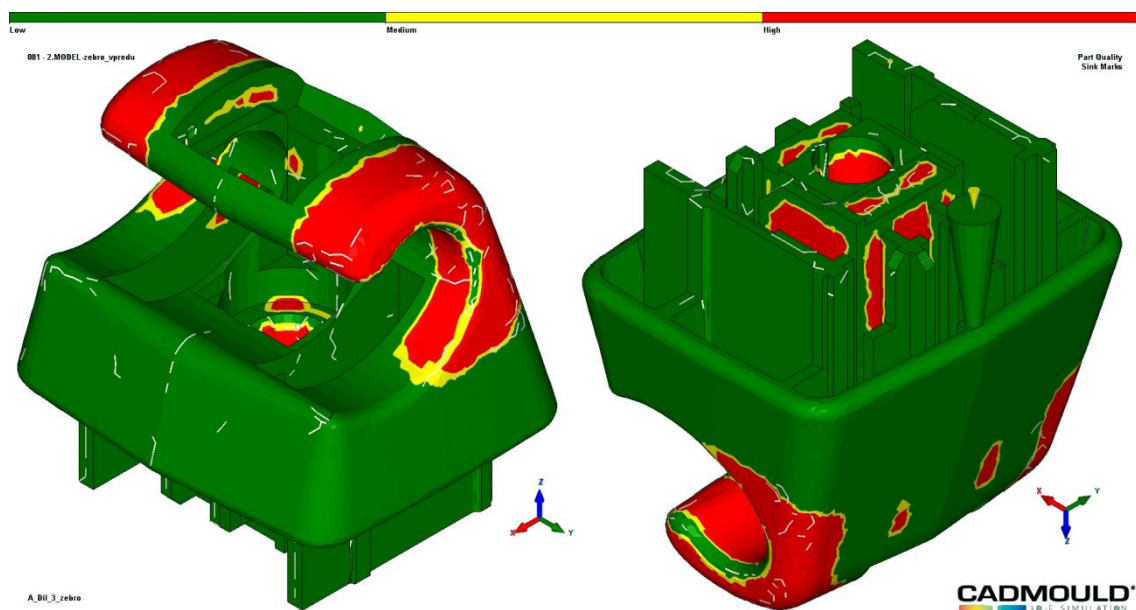
**Obr. 3.12:** Výsledky simulace vstřikování - propadliny a studené spoje (vtok v přední stěně)

### Vtok umístěn do žebra na zadní stěně dílu

Na obrázku 3.13 jsou výsledky zobrazující výskyt studených spojů a propadlin v případě umístění vtoku do žebra, které bylo obdobně jako v předchozí simulaci přidáno na zadní stěnu dílu.

Změnou umístění vtokového ústí byly odstraněny studené spoje na bocích a na zádech dílu, jediný výraznější spoj vznikl uprostřed přední stěny.

Až na mírné zlepšení na zadní stěně byl výskyt propadlin stejný, jako při předchozí variantě simulace se vtokem v žebro na přední stěně. To znamená, že opět vznikly výrazné propadliny na horní části pro čep, středním kvádru a na zádech dílu.



**Obr. 3.13:** Výsledky simulace vstřikování - propadliny a studené spoje (vtok v zadní stěně)

### 3.5.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ

Výsledky těchto tří simulací potvrdily, že změna umístění vtokového ústí nemá tak výrazný vliv na výskyt propadlin, jako konstrukční změny na dílu. Velký vliv má ovšem na vznik studených spojů.

Provedené konstrukční změny zajistily odstranění drobných propadlin, u ostatních však došlo ke zhoršení. Na některých místech se dokonce vyskytly velmi výrazné nové propadliny. Proto některé změny byly označeny za nevhodné, především nová konstrukce stropu dutiny se žebry. Ta způsobila vznik propadlin na zadní stěně dílu. V oblasti, kde se strop na tuto stěnu napojuje, byla stěna zesílena a nerovnoměrně se v těchto místech při ochlazování výstřiku smršťovala. Odstranění takto složitých úprav by bylo příliš obtížné, proto bude výhodnější další model vytvořit opět z původní první varianty.

Výrazného zlepšení však bylo dosaženo v oblasti výskytu studených spojů. Z tohoto hlediska se jako nejvhodnější jeví umístění vtokového ústí do žebra na zádech dílu. V takovém případě vznikl jen jediný výrazný spoj a to na přední stěně. Varianta s vtokem na přední stěně dílu sice také způsobila vznik studených spojů pouze na protilehlé stěně, ale ve větším rozsahu než varianta opačná. Naopak umístění vtoku do středního kvádru bylo nejméně vhodné, protože studené spoje se při této možnosti objevily na přední i zadní stěně. U této polohy vtoku lze navíc na hotovém výrobku předpokládat výskyt meandrového toku. Ten vzniká, pokud není tavenina vstřikována proti stěně - tak, jako tomu bylo v tomto případě.

### 3.6 SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ TŘETÍ VARIANTY KONSTRUKCE

#### Optimalizace konstrukce

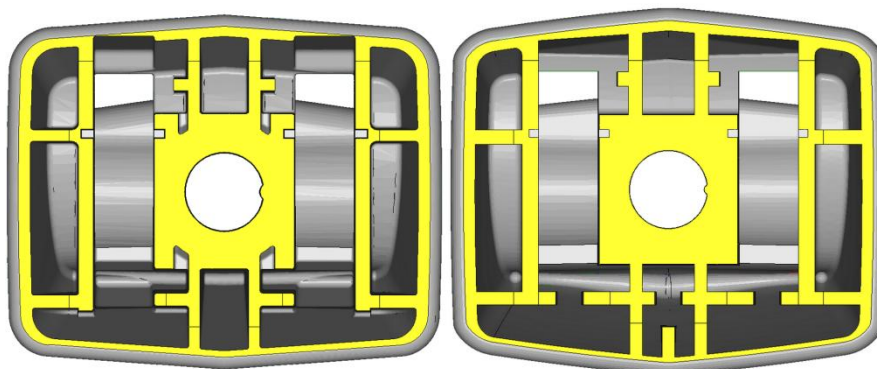
Na základě výsledků předchozích analýz byly konstrukční úpravy na druhém modelu shledány jako nevhodné, proto byl model třetí varianty vytvořen opět z původní konstrukce dílu, tedy z první varianty (obr 3.14).

Znovu byly odstraněny drážky v přední stěně a zbytečné zářezy na středním kvádru. I velká boční žebra byla opět zesílena na 1,3 mm a drážky v nich částečně vyplněny.

Novou změnou bylo zesílení vertikální dvojice žebér na zadní straně dílu z původních 0,75 mm na 1 mm. Přední dvojice žebér byla z důvodu menšího odporu proti toku taveniny a tím lepšího plnění přední stěny také zesílena - na 1,1 mm.

Další novou úpravou bylo zkrácení delší strany středního kvádru o 1 mm, čímž by mělo dojít ke zmenšení smrštění této partie dílu.

Poslední úpravou bylo zmenšení tupého úhlu mezi symetrickými polovinami přední a zadní stěny. Díky této úpravě byl zmenšen poloměr zaoblení v rozích, kde vznikaly propadliny. Dále díl získal lepší tvar pro obtékání taveninou obvodovými stěnami. Díl se tak ale nepatrně prodloužil od přední k zadní straně.



**Obr. 3.14:** První varianta modelu (vlevo) a třetí varianta modelu (vpravo)



### 3.6.1 VSTUPNÍ PARAMETRY SIMULACE

#### Umístění vtokového ústí

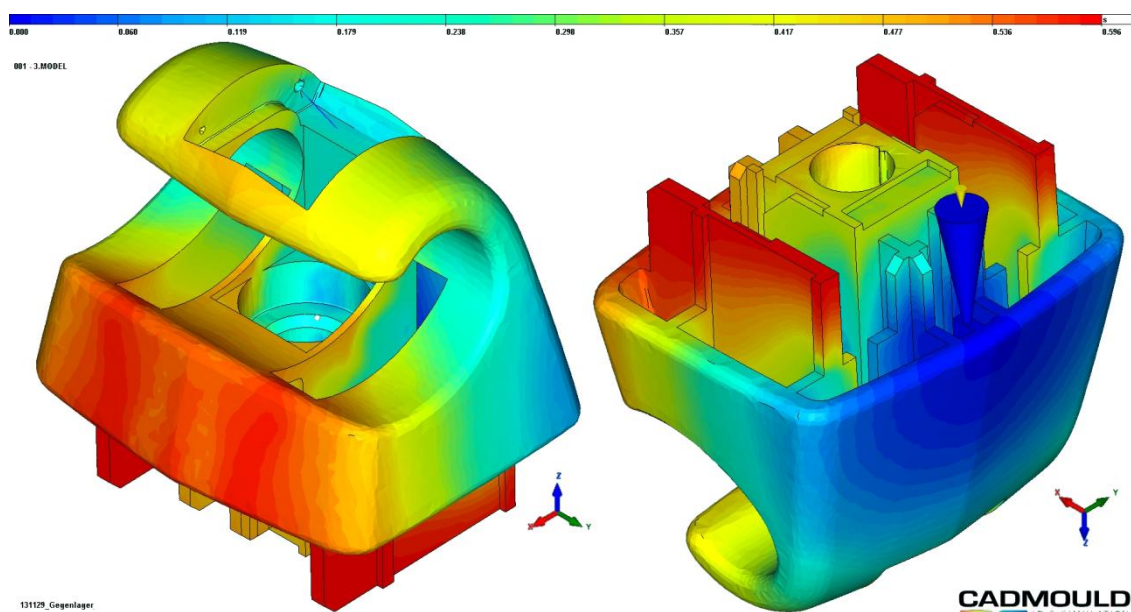
Vtokové ústí bylo umístěno do optimální pozice zjištěné předchozími simulacemi, tedy do žebra přidaného pro tento účel na zadní stěnu dílu. Předpokladem bylo, že plnění dutiny formy bude probíhat střední částí dílu a zároveň obvodovými stěnami. Následně se setkají dvě čela taveniny na přední stěně, kde pravděpodobně vznikne jediný studený spoj na díle, kterému se nelze vyhnout.

#### Vstřikovací podmínky

Vstřikovací podmínky zůstaly opět nezměněny. (viz. tab. 3.1.)

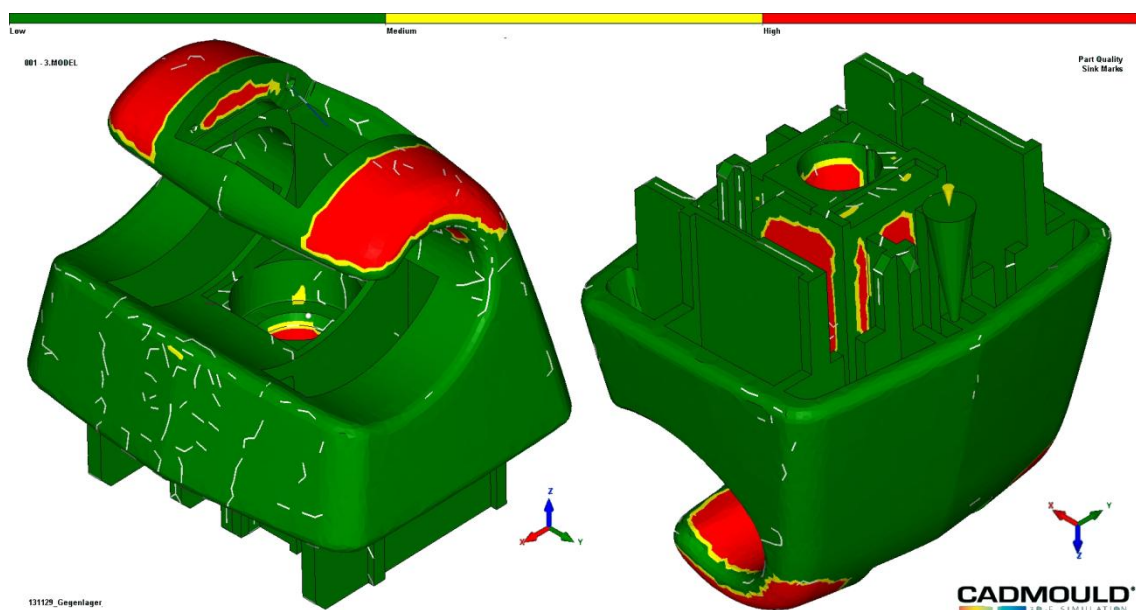
### 3.6.2 VÝSLEDKY SIMULACE

Z obrázku 3.15, kde jsou výsledky simulace v kategorii plnění dutiny formy, je zřejmé, že změnou umístění vtokového ústí do žebra na zadní stěně dílu došlo ke značné změně způsobu plnění dutiny formy. Díky menší vzdálenosti vtoku od horní části pro upevnění čepu se zkrátila dráha toku taveniny a rychleji a snáze se tak tato partie plnila. To by se mělo kladně projevit menším vznikem propadlin. Jako poslední se již neplnily boční stěny, ale stěna přední, na které se srazila dvě čela taveniny z boční stěny a z přední dvojice vertikálních žebírek. Již z časových výsledků plnění dutiny formy je patrné, že na této stěně nedojde k výskytu jediného studeného spoje, ale linií bude vedle sebe několik.



**Obr. 3.15:** Výsledky simulace vstřikování třetí varianty konstrukce – doba plnění

Na obr. 3.16 je vidět výskyt tří výraznějších linií studených spojů na přední stěně. Dále je patrné, že konstrukčními úpravami bylo zamezeno vzniku propadlin na zadní stěně a výrazně byly zmenšeny i propadliny na horní části pro zacvaknutí čepu.



**Obr. 3.16:** Výsledky simulace vstřikování třetí varianty konstrukce – propadliny a studené spoje

### 3.6.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE

Studené spoje se podle předpokladů vyskytly na přední stěně dílu. Jejich rozsah byl však větší, než se očekávalo. Proudny taveniny z bočních stěn se nespojily ve středu přední stěny, jak bylo zamýšleno, ale vznikly tři linie spojů vedle sebe. To bylo zapříčiněno nevhodně uspořádanými žebry, která se napojovala na přední stěnu a také zajišťovala její plnění taveninou.

Provedenými konstrukčními změnami bylo dosaženo zamezení vzniku většiny propadlin na dílu. Poslední problémovou oblastí zůstal střední kvádr, jehož konstrukce vyžaduje kompletní přepracování do vhodnějšího tvaru.

### 3.7 SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ ČTVRTÉ VARIANTY KONSTRUKCE

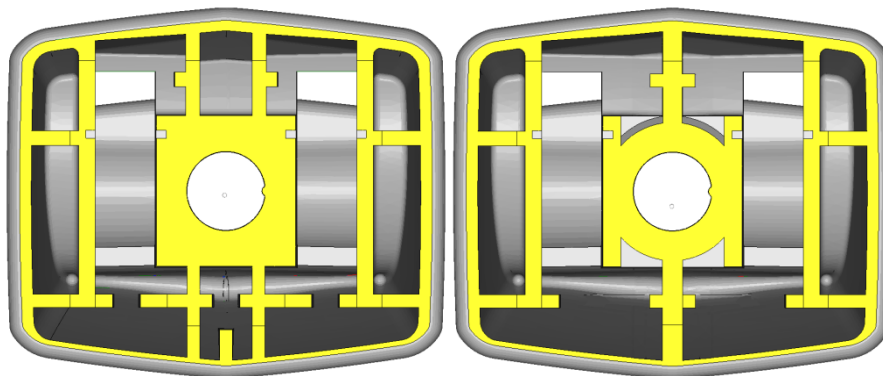
#### Optimalizace konstrukce

V poslední etapě úprav bylo nutné přistoupit k výraznějším konstrukčním změnám dílu.

Jak již bylo zmíněno, tak z hlediska studených spojů bylo nevhodné zdvojení žebírek spojujících střední kvádr s přední a zadní stěnou. Proto byla tato 1 mm silná žebra na zadní straně a 1,1 mm na přední straně nahrazena jedním, na obou stranách 1,5 mm silným, žebrem.

Další nezbytnou úpravou pro odstranění propadlin byla změna konstrukce středního kvádru. Tvar kvádru s kruhovým otvorem uprostřed není pro technologii

vstřikování vhodný, protože kvůli rohům nemůže být síla stěny okolo kruhového otvoru nikdy po celém obvodu stejná. Původní kvádr byl proto přepracován do podoby válce s konstantní tloušťkou stěny 2 mm. Na místě, kde byly drážky pro ustavení dílu, byla ponechána dvě 1,3 mm silná žebra, která se na stěnu válce tečně napojovala.



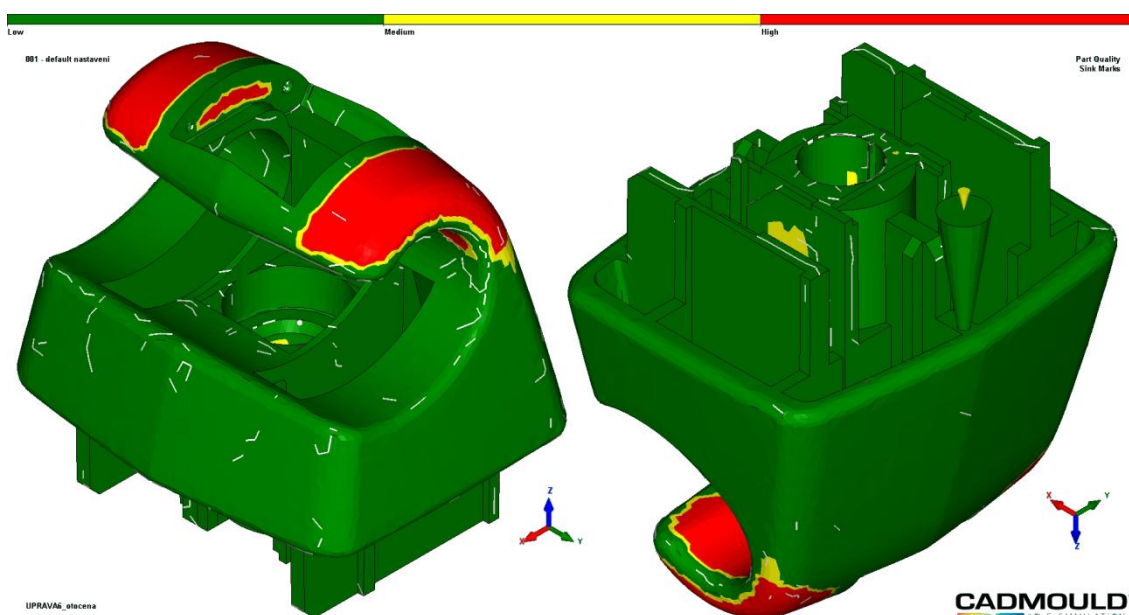
**Obr. 3.17:** Třetí varianta modelu (vlevo) a čtvrtá varianta modelu (vpravo)

### Umístění vtokového ústí a volba vstřikovacích podmínek

Umístění vtoku zůstalo beze změn. Vstřikovací parametry byly opět stanoveny programem.

#### 3.7.1 VÝSLEDKY SIMULACE

Výsledky na obrázku 3.18 ukázaly, že obě provedené změny byly podle očekávání přínosné. Vznik studených spojů na přední stěně byl omezen na dvě nevýrazné linky. Také výskyt propadlin na stěnách okolo otvoru pro šroub byl zredukován na minimum.



**Obr. 3.18:** Výsledky simulace vstřikování čtvrté varianty konstrukce – propadliny a studené spoje

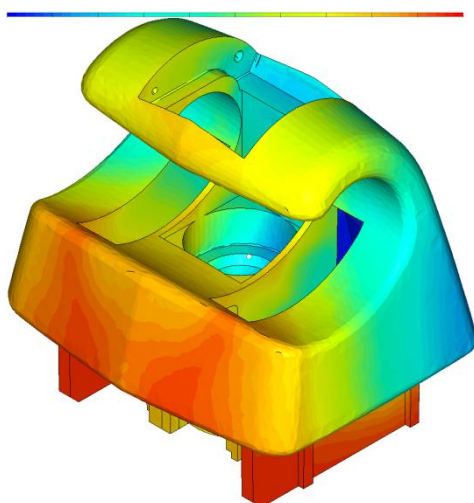


### 3.7.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE

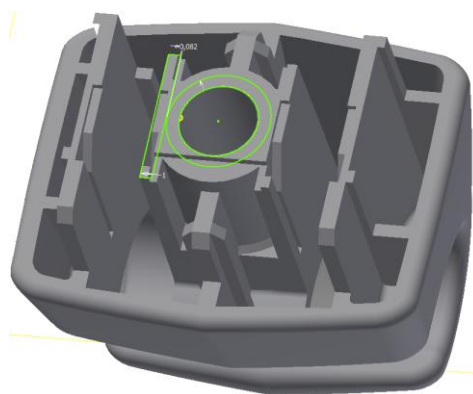
Paralelně umístěná vertikální žebra způsobovala vznik studených spojů na přední stěně dílu. Těmito žebry při plnění dutiny formy proudila tavenina do přední stěny a spojovala se mezi nimi. Současně tekla stěnou k jejím okrajům a zhruba v polovině cesty se spojovala s taveninou z bočních stěn. V těchto místech vznikal po obou stranách další studený spoj. Odstraněním dvojice vertikálních žebírek a jejich následným nahrazením žebrem jediným došlo k zamezení vzniku spoje mezi žebry. Větší síla nového žebra změnila i způsob plnění přední stěny, které nyní probíhalo částečně shora (obr. 3.19), což potlačilo i vznik spojů na soutoku taveniny s proudy z bočních stěn.

Druhá změna, úprava středového kvádru na válec, zmenšila a zrovnoměnila sílu stěny okolo otvoru. Vznik propadlin na této části dílu byl tak podstatně zmírněn. Jejich kompletní odstranění by pravděpodobně vyžadovalo úplné oddělení stěny válce od sousedních žebírek, jak je naznačeno na obrázku 3.20. Samostatně stojící žebra by nebyla dostatečně tuhá a ohýbala by se. Proto by musela mezi stěnou válce a žebrem vzniknout ještě dostatečně velká mezera pro spojení kolmým žebrem. Tato možnost není proveditelná, protože žebra s drážkami a kruhový otvor leží příliš blízko sebe a jejich rozměry ani polohu nelze měnit.

Pokud opomineme vrchní část dílu, kde lze propadliny odstranit pouze změnou designu, což není v rámci této práce možné, lze z tvarového hlediska čtvrtou variantu modelu považovat za optimalizovanou. Zbývající drobné vady budou odstraněny změnou vstřikovacích podmínek v další kapitole.



**Obr. 3.19:** Výsledky simulace vstřikování čtvrté varianty konstrukce – doba plnění (pohled na přední stěnu)



**Obr. 3.20:** Náčrt možnosti oddělení stěny válce od sousedního žebra (bez mezery pro žebro)

### 3.8 OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍCH PARAMETRŮ

Všechny předchozí simulace byly provedeny za přibližně stejných, programem stanovených, vstřikovacích podmínek. Software vstřikovací podmínky stanovuje na základě zvoleného materiálu a rozměrnosti simulovaného dílu. Při postupně prováděných konstrukčních úpravách docházelo k drobným změnám tvaru součástí a tím i jejího objemu. Proto se jednotlivé procesní parametry jako jsou vstřikovací časy, doby dotlaku, nebo doby ochlazování součástí nepatrně lišily. Pro tvarově optimalizovaný díl program stanovil vstřikovací parametry zapsané v tabulce 3.2.

**Tab. 3.2:** Programem navržené vstřikovací parametry pro tvarově optimalizovaný díl.

Parametr	Jednotky	Hodnota
Doba plnění	[s]	0,631
Doba dotlaku	[s]	6,2
Velikost dotlaku	[bar]	900
Doba chladnutí	[s]	10,5
Teplota taveniny	[°C]	210
Teplota stěny formy	[°C]	90

Nesprávně nastavené technologické parametry mohou vyvolat většinu známých vad (vady povrchu, tvaru i vady skryté). Výhodou takto způsobených vad je, že je lze odstranit změnou jednoho či více parametrů. Pokud je to možné, přednostně se volí změna parametrů s okamžitou reakcí na následný vstřikovací cyklus (tlaky, rychlosti, časy...), a pokud tyto změny nevedou k odstranění vady, mění se také teploty (teplota formy, taveniny). Změna teploty však vyžaduje více vstřikovacích cyklů k ustálení procesu. [10]

Podle výsledků procesní simulace čtvrté varianty modelu se konstrukčními úpravami nepodařilo odstranit středně velké propadliny na středním kvádru a zbytky studených spojů na přední stěně. Pro obě tyto vady se obecně doporučuje zvýšení dotlaku a zkrácení doby vstřiku. Dále se pro odstranění studených spojů v praxi zvyšuje teplota taveniny a teplota formy (tato možnost prodlužuje ochlazovací dobu o 2 % na jeden °C). Na vznik propadlin má ale zvyšování teploty formy opačný účinek, protože se jím zvětšuje výrobní smrštění. Z tohoto důvodu a z důvodů zmíněných výše byla teplota formy i taveniny ponechána na původních hodnotách a upravena byla pouze dotlaková fáze a fáze vstřiku. Vstřikovací část cyklu byla zkrácena z 0,631 s na 0,5 s a velikost dotlaku byla navýšena o 200 barů. Upravené vstřikovací parametry jsou zapsány v tabulce 3.3.

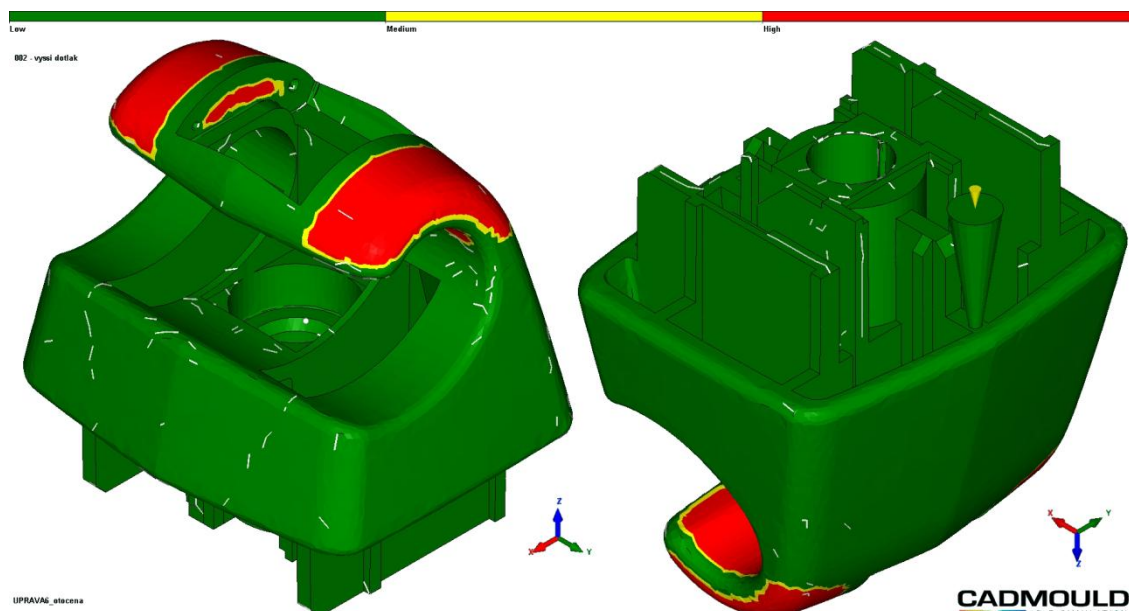
**Tab. 3.3:** Upravené vstřikovací parametry pro tvarově optimalizovaný díl.

Parametr	Jednotky	Hodnota
Doba plnění	[s]	0,5
Doba dotlaku	[s]	5
Velikost dotlaku	[bar]	1100
Doba chlazení	[s]	10,5
Teplota taveniny	[°C]	210
Teplota stěny formy	[°C]	90

### 3.8.1 VÝSLEDKY SIMULACE PO ZMĚNĚ VSTŘIKOVACÍCH PARAMETRŮ

Při simulaci vstřikování tvarově optimalizovaného dílu bylo vtokové ústí opět umístěno do osvědčené polohy na žebro zadní stěny dílu. Vstřikovací parametry byly upraveny podle tabulky 3.3. Průběh dotlakové fáze byl dále profilován se sestupnou tendencí (30 – 50 % doby dotlaku je potřebná maximální hodnota, potom mírný pokles), protože platí, že čím jemnější dotlaková fáze je, tím je i menší vnitřní pnutí v daném výstřiku.

Na výsledcích simulace (obr. 3.21) se ukázalo, že předpoklad se zvýšením dotlaku a zkrácením doby vstřiku byl správný. Zbylé propadliny na střední části dílu byly úspěšně odstraněny. Mírné zlepšení nastalo i ve sníženém výskytu studených spojů na přední stěně.



**Obr. 3.21:** Výsledky simulace vstřikování čtvrté varianty konstrukce – propadliny a studené spoje (po změně vstřikovacích podmínek)

### 3.8.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Provedené změny procesních parametrů úspěšně zajistily odstranění propadlin na středním kvádru. Při chladnutí materiálu docházelo v dutině formy ke smršťování výstřiku. Ten se smršťoval více na silnějších stěnách, než na stěnách slabších. To mělo za následek vznik propadlin v těchto místech. Zvýšením tlaku ve fázi dotlačování bylo do dutiny formy natlačeno větší množství plastu během kratšího času, čímž byly vykompenzovány i větší rozdíly ve smrštění.

Zvolená velikost dotlaku 1100 barů je již na horní hranici použitelnosti pro zpracováváný materiál POM. Příliš vysoký tlak by mohl vést ke vzniku přestříků a dalším problémům jako vznik pnutí ve výstřicích, kroucení a další.

## 4 DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Postupnými konstrukčními změnami na dílu bylo dosaženo primárního cíle této práce, tedy omezení výskytu vad způsobených konstrukcí nevhodnou pro technologii vstřikování na minimum. Jejich úplné odstranění ani není možné, žádný výrobek totiž nelze vyrobit naprosto bez vad.

Bylo zjištěno, že největší vliv na vznik studených spojů mělo špatné umístění vtokového ústí a dále nevhodná konstrukce paralelně uspořádaných vertikálních žebër. Na vznik propadlin měla velký vliv nevhodně volená tloušťka stěn, nerovnoměrné ochlazování některých partií a především špatná konstrukce středního kvádru. Pro vtokové ústí byla nalezena optimální poloha. Konstrukční změny byly provedeny v souladu s funkcí dílu, a to tak, aby nebylo zasaženo do pevně daných rozměrů, jako je třeba průměr otvoru pro šroub, průměr držáku pro čep, nebo rozteč žebër sloužících k ustavení součásti v interiéru.

Pro úplné odstranění propadlin na nejproblémovější partii okolo kruhového otvoru bylo třeba pozměnit i procesní parametry, zejména upravit dotlakovou fázi cyklu. Studené spoje se tímto krokem nepodařilo zcela odstranit. Jejich výskyt se však podařilo zmírnit do takové míry, že by se na vzhledu hotového výrobku neměly výrazněji projevit.

Všechny provedené změny, jak na konstrukci, tak změny procesních parametrů, měly za následek nejen požadované zamezení vzniku vad, ale také jimi bylo dosaženo změn ekonomických. Úpravami konstrukce došlo ke zvětšení objemu součásti z 6,1 cm<sup>3</sup> na 6,4 cm<sup>3</sup>, což bude mít za následek zvýšení konečné hmotnosti výstřiku a bohužel i větší spotřebu materiálu. Oproti tomu pozitivní změnou bylo zkrácení vstřikovacího cyklu o jednu sekundu. Toho bylo dosaženo úpravou technologických podmínek. Konečná doba vstřikovacího cyklu optimalizovaného dílu tak klesla z původních 12 sekund na 11 sekund.

## 5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo za pomoci simulační analýzy vstřikovacího procesu tvarově optimalizovat konstrukci plastového držáku sluneční clony. Simulace byly provedeny v softwaru Cadmould 3D-F na katedře Strojírenské technologie. Záměrem bylo na základě výsledků procesních simulací odhalit chyby a nedostatky na původní konstrukci dílu, následně je odstranit a omezit tak vznik vad na hotovém výrobku na minimum. Posledním úkolem bylo pro tvarově optimalizovaný díl upravit vstřikovací parametry.

V teoretické části práce byl proveden rozbor technologie vstřikování. V této kapitole byl také popsán vliv technologických podmínek na vlastnosti výstřiků, byly zde uvedeny základní druhy vtoků a jejich vliv na proudění taveniny při plnění dutiny formy. Dále zde byla popsána problematika konstrukčního řešení strojírenských výrobků z plastů a v souvislosti s ní i příčiny vzniku a možnosti odstranění některých nejčastěji se vyskytujících vad na plastových dílech.

V experimentální části byl ve čtyřech kapitolách popsán proces optimalizace konstrukce zadaného dílu. Ve své první podobě nebyl díl příliš vhodný pro technologii vstřikování a jeho konstrukce byla značně nedokonalá. Na základě výsledků simulace plnění dutiny formy taveninou a následného chladnutí byla nalezena kritická místa vzniku výrazných propadlin a studených spojů. Model výlisku byl proto přepracován do podoby druhé konstrukční varianty. Změny na tomto modelu sice do jisté míry odstranily vznikající vady, ale způsobily jejich vznik na jiných místech. Simulace vstřikování tohoto modelu byla přínosná pouze v nalezení vhodné polohy vtokového ústí. Z hlediska konstrukčních změn byla druhá varianta označena za nevhodnou. Proto vznikla třetí varianta modelu provedením jiných změn opět z původní první konstrukce. Simulace vstřikování třetí varianty už přinesla výrazné zlepšení v oblasti sledovaného vzniku vad. V posledním kroku optimalizace konstrukce bylo pro další zlepšení již nutné přistoupit k razantnějším změnám. Bylo upraveno uspořádání vnitřních žebër tak, aby došlo k odstranění vzniku vad a zároveň zůstala zachována funkčnost dílu. Tyto změny téměř úplně odstranily vznik posledních vad.

Poslední kapitola této části se zabývá úpravou vstřikovacích parametrů pro tvarově optimalizovaný díl. V této části se podařilo změnit vstřikovací podmínky takovým způsobem, aby došlo k odstranění posledních zbytků propadlin. Tímto krokem bylo splněno zadání práce, jejímž výsledkem je tvarově vhodně konstruovaný díl pro technologii vstřikování.

Dále by tuto práci bylo možné rozšířit o přepracování konstrukce horní poloviny dílu. Tím by bylo dosaženo omezení vzniku vad na úplné minimum. Následně by bylo možné zabývat se návrhem celé vstřikovací formy. Vyřešit otázku zaformování výstřiku, násobnosti formy, dále navrhnout konstrukci vtokového a temperančního systému, popřípadě zajistit vhodné odvětrání a vyhazování výstřiků z formy.

## Seznam použité literatury:

- [1] ŠTĚPEK, J.; ZELINGER, J.; KUTA, A.: *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. Praha: SNTL a Alfa Bratislava, 1989. 638 s. ISBN 04-602-89
- [2] ZEMAN, L.: *Vstřikování plastů*. Praha: BEN – technická literatura, 2009. 248 s. ISBN 80-7300-023-1
- [3] KOLOUCH, J.: *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním*. Praha: SNTL, 1986. 232 s. ISBN 04-247-86
- [4] KREBS, J.: *Teorie a technologie zpracování plastů*. Liberec: TUL, 1981. 341 s. ISBN 55-823-80
- [5] LENFELD, P a kolektiv.: *Strojírenská technologie – Vybrané prezentace*. Liberec: TUL, 2008. 247 s. ISBN 978-80-7372-326-2
- [6] LENFELD, P.: *Technologie II – Část 2: zpracování plastů*. Liberec: TUL.  
Dostupné z:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [7] LENFELD, P.: *Technologie II – Část 2: zpracování plastů*. Liberec: TUL.  
Dostupné z:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm)
- [8] *Fyzikální vědy o materiálu* [online]. Brno: Pedagogická fakulty Masarykovy univerzity [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
<http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm>
- [9] PLACHÁ KRÁLOVÁ, Alžběta.: Principy konstrukce plastových výlisků. *MM Průmyslové spektrum. Trendy/Plasty* [online]. Praha: MM Publishing, 2013, č. 1 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/principy-konstrukce-plastovych-vylisku.html>
- [10] NEUHÄUSL, Emil.: Vady výstřiků 1. díl – Příčiny vzniku vad a studené spoje. *MM Průmyslové spektrum. Výroba/Plasty* [online]. Praha: MM Publishing, 2010, č. 3 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priciny-vzniku-vad-a-studene-spoje.html>
- [11] NEUHÄUSL, Emil.: Vady výstřiků 2. díl – Vady tvaru a rozměrové vady. *MM Průmyslové spektrum. Výroba/Plasty* [online]. Praha: MM Publishing, 2010, č. 4 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-2-dil-vady-tvaru-a-rozmerove-vady.html>

- [12] NEUHÄUSL, Emil.: Vady výstřiků 3. díl – Vady vzhledové. *MM Průmyslové spektrum. Výroba/Plasty* [online]. Praha: MM Publishing, 2010, č. 5 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-3-dil-vady-vzhledove.html>
- [13] Resinex. *Resinex.cz* [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
<http://www.resinex.cz/produkty/hostaform.html>
- [14] Simcon. *Simcon-worldwide.com* [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
<http://www.simcon-worldwide.com/pages/en/home.php?lang=EN>
- [15] GABRIEL, Jiří.: Analýza vstřikování Cadmould – přehled podkladů pro zakázkové i uživatelské zpracování nových projektů. *Technický týdeník – průmyslový portál*. [online]. Praha, 2006, č. 5 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z:  
[http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/analiza-vstrikovani-cadmould-prehled-podkladu-pro-zakazkove-i-uzivatelske-zpracovani-novych-projektu\\_11287.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/analiza-vstrikovani-cadmould-prehled-podkladu-pro-zakazkove-i-uzivatelske-zpracovani-novych-projektu_11287.html)
- [16] KOPŘIVA, Miloslav.: Počítačová podpora technologie. [online] Brno: VUT, 2002 [cit. 2014-03-10] Dostupné z:  
[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/pocitacova\\_podpora\\_technologie\\_-\\_kopriva.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/pocitacova_podpora_technologie_-_kopriva.pdf)



## Seznam obrázků:

<b>Obr. 2.1:</b> Lineární uspořádání .....	12
<b>Obr. 2.2:</b> Rozvětvené uspořádání .....	12
<b>Obr. 2.3:</b> Síťované uspořádání.....	12
<b>Obr. 2.4:</b> Struktura semikrystalického polymeru.....	12
<b>Obr. 2.5:</b> Průběh deformačních vlastností u amorfního plastu.....	13
<b>Obr. 2.6:</b> Průběh deformačních vlastností u semikrystalického plastu.....	13
<b>Obr. 2.7:</b> Vstřikovací stroj s pístovou vstřikovací jednotkou.....	14
<b>Obr. 2.8:</b> Časová závislost tlaku $p_i$ v dutině formy při vstřikování .....	15
<b>Obr. 2.9:</b> Orientace a protažení polymerních řetězců v oblastech s různými tokovými rychlostmi .....	18
<b>Obr. 2.10:</b> Základní druhy vtoků.....	19
<b>Obr. 2.11:</b> Vliv úkosu na tloušťku stěny.....	21
<b>Obr. 2.12:</b> Vhodná varianta konstrukce úchyty .....	22
<b>Obr. 2.13:</b> Nevhodná konstrukce v rohu stěn .....	22
<b>Obr. 2.14:</b> Analýza vtoků.....	22
<b>Obr. 2.15:</b> Přetok na výstřiku .....	24
<b>Obr. 2.16:</b> Stopy po volném proudu taveniny .....	25
<b>Obr. 2.17:</b> Vzhled gramofonové desky .....	25
<b>Obr. 3.1:</b> Čep clony upevněný v držáku .....	27
<b>Obr. 3.2:</b> Studené spoje na bocích dílu .....	28
<b>Obr. 3.3:</b> Vady lesku na zádech dílu .....	28
<b>Obr. 3.4:</b> Popis konstrukčně variabilní spodní poloviny dílu .....	29
<b>Obr. 3.5:</b> Nerovnoměrná síla stěny okolo otvoru pro šroub .....	30
<b>Obr. 3.6:</b> Umístění vtokového ústí.....	30
<b>Obr. 3.7:</b> Výsledky simulace vstřikování první varianty konstrukce – čas plnění .....	31
<b>Obr. 3.8:</b> Výsledky simulace vstřikování první varianty konstrukce – propadliny a studené spoje .....	32
<b>Obr. 3.9:</b> První varianta modelu (vlevo) a druhá varianta modelu (vpravo).....	33
<b>Obr. 3.10:</b> Žebro (červeně) přidané z důvodu umístění vtokového ústí na přední a zadní stěnu.....	34
<b>Obr. 3.11:</b> Výsledky simulace vstřikování - propadliny a studené spoje (vtok uprostřed).....	34
<b>Obr. 3.12:</b> Výsledky simulace vstřikování - propadliny a studené spoje (vtok v přední stěně) .....	34

<b>Obr. 3.13:</b> Výsledky simulace vstřikování - propadliny a studené spoje (vtok v zadní stěně) .....	36
<b>Obr. 3.14:</b> První varianta modelu (vlevo) a třetí varianta modelu (vpravo).....	37
<b>Obr. 3.15:</b> Výsledky simulace vstřikování třetí varianty konstrukce – doba plnění .....	38
<b>Obr. 3.16:</b> Výsledky simulace vstřikování třetí varianty konstrukce – propadliny a studené spoje .....	39
<b>Obr. 3.17:</b> Třetí varianta modelu (vlevo) a čtvrtá varianta modelu (vpravo) .....	40
<b>Obr. 3.18:</b> Výsledky simulace vstřikování čtvrté varianty konstrukce – propadliny a studené spoje .....	41
<b>Obr. 3.19:</b> Výsledky simulace vstřikování čtvrté varianty konstrukce – doba plnění (pohled na přední stěnu).....	41
<b>Obr. 3.20:</b> Náčrt možnosti oddělení stěny válce od sousedního žebra (bez mezery pro žebro) .....	41
<b>Obr. 3.21:</b> Výsledky simulace vstřikování čtvrté varianty konstrukce – propadliny a studené spoje (po změně vstřikovacích podmínek) .....	43

#### **Seznam tabulek:**

<b>Tab. 3.1:</b> Programem navržené vstřikovací parametry .....	31
<b>Tab. 3.2:</b> Programem navržené vstřikovací parametry pro tvarově optimalizovaný díl .....	42
<b>Tab. 3.3:</b> Upravené vstřikovací parametry pro tvarově optimalizovaný díl .....	43